



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

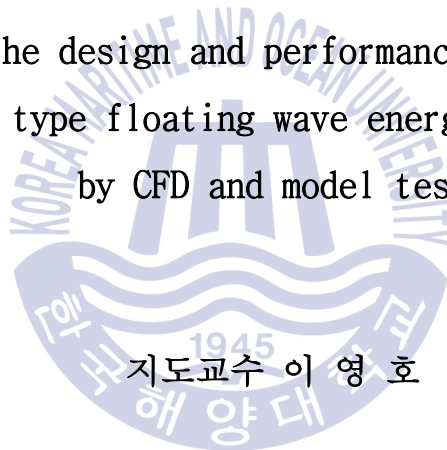
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

유동해석 및 모델 시험을 통한 U-tube형  
부유식 파력발전장치의 설계 및  
성능 검증에 관한 연구

A study on the design and performance verification of  
U-tube type floating wave energy converter  
by CFD and model test



지도교수 이 영 호

2018년 2월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 병 하

본 논문을 김병하의 공학박사 학위논문으로 인준함.



위원장	조 종 래
위 원	김 유 택
위 원	최 영 도
위 원	황 태 규
위 원	이 영 호



2017년 12월 27일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iv
List of Figures .....	vi
Abstract .....	xi

## 1. 서 론

1.1 연구배경 .....	1
1.1.1 시장현황 .....	4
1.1.2 국외 기술개발 현황 .....	5
1.1.3 국내 기술개발 현황 .....	9
1.2 연구방법 및 연구목표 .....	11
1.2.1 PTO시스템 설계 .....	13
1.2.2 부유체 및 계류시스템 설계 .....	14
1.2.3 스케일 모델 테스트 및 실험 진행 .....	15

## 2. 파력발전장치 수학적 모델링

2.1 부유체의 수동력학적 수치모델 .....	16
2.1.1 파력발전장치의 수동력학적 이론 .....	18
2.1.2 파력발전장치 U-탱크 내부의 수학적 모델링 .....	21
2.1.3 파력발전장치 양방향 수력터빈 수학적 모델링 .....	23
2.1.4 파력발전장치 수학적 모델링 .....	24
2.1.5 파력발전장치 Rolling 고유진동수 .....	25

<b>3. 실패역 시험 위치 선정 및 파랑계측</b>	
3.1 설치해역 선정 .....	26
3.2 설치해역 기상 조건 검토 .....	28
3.3 실패역 파랑계측 .....	29
3.4 실패역 시험 장소의 파랑일률 산정 .....	33
<b>4. PTO 시스템 연구</b>	
4.1 PTO모델 성능해석 및 실험 .....	36
4.2 부유체 - 내부유동모델의 CFD을 통한 연계 해석 .....	49
<b>5. 파랑수조 모델 테스트</b>	
5.1 1:20 scale 부유체 응답 시험 .....	52
5.2 20W 파력발전시험모델의 파랑수조 모형 시험 .....	54
5.2.1 시험 목적 .....	54
5.2.2 시험 장치 설계 .....	54
5.2.3 파랑 수조 .....	57
5.2.4 실험 케이스 .....	59
5.2.5 실험 결과 (정현파) .....	59
5.2.6 실험 결과 (불규칙파) .....	66
5.3 최적 설치수심 선정을 위한 파랑 모델 테스트	
5.3.1 실험장치 제작 및 설치 .....	69
5.3.2 실험 결과 .....	73
<b>6. 실패역 파력발전장치 설계 및 시험</b>	
6.1 실패역 PTO 시스템 유동해석 .....	77
6.1.1 실패역 PTO 시스템 유동해석 모델 .....	77
6.1.2 실패역 PTO 시스템 유동해석 격자계 .....	79
6.1.3 실패역 PTO 시스템 유동해석 경계조건 .....	80
6.1.4 내부유동모델의 바닥면 각 변화에 따른 실패역 PTO 시스템 유동해석 결과 .....	81

6.1.5 내부유동모델의 Pitching 각과 Pitching 주기의 변화에 따른 실효역 PTO 시스템 유동해석 결과 .....	89
6.2 계류 시스템 설계 .....	91
6.2.1 계류 시스템 응답성능 해석 및 결과 .....	94
6.2.2 계류 시스템 설계 .....	100
6.3 실효역 시험장치 부유체 .....	102
6.4 실효역 시험장치 내부 PTO 시스템 .....	104
6.5 계측 시스템 및 기타장치 .....	107
6.5.1 통신 모듈 .....	110
6.5.2 파랑 관측 모니터링 시스템 .....	112
6.6 해상 설치 .....	114
6.7 실효역 시험 결과 .....	117
7. 결 론 .....	121
8. 참고 문헌	

## List of Tables

Table 1.1 List of wave energy R&D project in worldwide .....	7
Table 1.2 List of wave energy R&D project in Korea .....	10
Table 1.3 Technical output of phases (EMEC, 2009) .....	12
Table 3.1 Wave measuring information .....	30
Table 4.1 Blade parameters .....	30
Table 4.2 Turbine performance test condition at no load condition .....	38
Table 4.3 Turbine performance test condition at load condition .....	38
Table 4.4 Wave reconditions using the linear wave theory and the calculated results .....	51
Table 5.1 Measuring parameters .....	55
Table 5.2 Design parameter of 20W model test .....	56
Table 5.3 Wave tank specifications .....	57
Table 5.4 Calibration variable .....	58
Table 5.5 No-load test results according to $T_P$ .....	61
Table 5.6 No-load test results according to $H_S$ .....	62
Table 5.7 Load test results ( $T_P = 2s$ , $H_S = 103mm$ ) .....	63
Table 5.8 Load test results ( $T_P = 2s$ , $H_S = 178mm$ ) .....	64
Table 5.9 Load test results ( $T_P = 2s$ , $H_S = 256mm$ ) .....	64
Table 5.10 Load test results ( $T_P = 2.3s$ , $H_S = 165mm$ ) .....	65
Table 5.11 Load test results ( $T_P = 2.3s$ , $H_S = 288mm$ ) .....	65
Table 5.12 Wave height and Wave length of tested wave condition ....	72

Table 5.13 Optimum length of WEC device for operation at different wave conditions ..... 76

Table 6.1 Real sea model parameter for PTO analysis ..... 78

Table 6.2 Mesh statistics for real sea PTO numerical model ..... 79

Table 6.3 Boundary condition for real sea PTO numerical model ..... 80

Table 6.4 General specifications of floater ..... 97

Table 6.5 Mooring specifications ..... 101

Table 6.6 1kW generator specifications (Seoyoung tech. co) ..... 105

Table 6.7 Real sea test results ..... 119





## List of Figures

Fig. 1.1 Annual global gross theoretical wave power for all world waves grid points worldwide (Gunar Mørk, et al., 2011) .....	2
Fig. 1.2 Averaged wave power considering waves of 1m to 4m height only (Song, et al., 2004) .....	4
Fig. 1.3 Wave power market, global, installed capacity, MW, 2015~ 2030 (Global Data, 2012) .....	5
Fig. 1.4 Various prototype wave energy converters in worldwide .....	8
Fig. 1.5 Various prototype wave energy converters in korea .....	10
Fig. 1.6 Concept graphic of FWEC with double hull structure .....	12
Fig. 1.7 Design methodology of PTO system .....	13
Fig. 1.8 Design methodology of hydrodynamic and mooring system ....	14
Fig. 1.9 Flow chart of experimental .....	15
Fig. 2.1 perspective view of FWEC. the degree of freedom of the FWEC .....	17
Fig. 2.2 Movements of a floating body in contact with a fluid .....	18
Fig. 2.3 U-shape tank dimension, passive U-tank mathematical model (Lloyd's method, 1989) .....	23
Fig. 3.1 Pilot chart (25000:1) .....	27
Fig. 3.2 Numerical water depth map (25000:1) -water depth : 7m .....	27
Fig. 3.3 Hybrid generating buoy (Oh, et al., 2010) .....	28
Fig. 3.4 Scatter plot of $H_s$ and $T_p$ .....	30

Fig. 3.5 Time series graph of $H_s$ (2015.03.26~2015.08.01.)	31
Fig. 3.6 Distribution of $H_s$ (2015.03.26~2015.08.01.)	31
Fig. 3.7 Time series graph of $T_p$ (2015.03.26~2015.08.01.)	32
Fig. 3.8 Distribution of $T_p$ (2015.03.26~2015.08.01.)	32
Fig. 3.9 Distribution of $P_w$ (2015.03.26~2015.08.01.)	34
Fig. 3.10 Monthly average wave energy (2015.03.26~2015.08.01.)	35
Fig. 4.1 Details of the cross-flow turbine used in the setup	42
Fig. 4.2 Water velocity vector and water volume fraction at various time step at concept model	42
Fig. 4.3 Geometric details of the double-hull of the device	43
Fig. 4.4 Picture of the device on the ocean simulator	43
Fig. 4.5 The rotational speed, $N$ , and flowrate, $Q$ , at different pitching angles, $\Theta$	44
Fig. 4.6 The rotational speed, $N$ , and flowrate, $Q$ , at different wave periods, $T$	44
Fig. 4.7 Hydraulic efficiency, $\eta$ , against flywheel weight for $N = 40$ and 50 RPM and for $T = 3$ s and $T = 2$ s	45
Fig. 4.8 Hydraulic efficiency, $\eta$ , against $N$ for $T = 3$ s, $T = 2$ s	46
Fig. 4.9 CFD analysis results & comparison of hydraulic efficiency and hydraulic power at $\Theta = 6$ and $N = 40$ RPM between numerical models and experimental results	47
Fig. 4.10 PIV vectors and CFD vectors for $T=3$ s, $q=6$ , and $N=40$ RPM	48
Fig. 4.11 Side elevation of the floating body model simulation	50
Fig. 4.12 1kW concept model results of (hydrodynamic - PTO) coupled analysis	50

Fig. 5.1 Experiment setup of floating model .....	53
Fig. 5.2 Picture of the drawing and floating model .....	53
Fig. 5.3 Test device for 20W-class experimental setup in wave tank ...	55
Fig. 5.4 Schematic view of the wave energy device and location of test device .....	56
Fig. 5.5 Wave maker calibration .....	54
Fig. 5.6 Evaluation of the dependency of the model towards wave period in regular waves under no load conditions .....	61
Fig. 5.7 Evaluation of the dependency of the model towards wave height in regular waves under no load conditions .....	62
Fig. 5.8 Performance at optimum load for three sea states .....	63
Fig. 5.9 Irregular wave (JONSWAP spectrum) FFT analysis .....	67
Fig. 5.10 Irregular wave (ITTC Spectrum) FFT analysis .....	68
Fig. 5.11 Time series data at Irregular Wave (JONSWAP Spectrum) condition .....	69
Fig. 5.12 Time series data at Irregular Wave (ITTC Spectrum) condition .....	69
Fig. 5.13 Top schematic view of the wave energy converter and location of test device .....	70
Fig. 5.14 Overall view of experimental setup .....	70
Fig. 5.15 Wireframe model of WEC .....	71
Fig. 5.16 Nozzle and cross-flow turbine setup .....	71
Fig. 5.17 Plot of N according to $H_s$ at each $\lambda$ conditions .....	73

Fig. 5.18 Time series data of the pitching angle and heaving amplitude at different $\lambda$ .....	74
Fig. 5.19 Comparison of pitching amplitude plotted versus time for $\lambda$ of 2.3 m and 2.6 m .....	75
Fig. 5.20 Heaving amplitude (right) plotted versus time for $\lambda$ of 2.3 m and 2.6m .....	76
Fig. 6.1 Fluid model for CFD analysis .....	77
Fig. 6.2 Mesh of PTO analysis for real sea model .....	79
Fig. 6.3 Velocity field and VoF of model with bottom 10degree .....	84
Fig. 6.4 Velocity field and VoF of model with Flat bottom .....	87
Fig. 6.5 Graph of flow rate comparing flat bottom and 10degree model .....	88
Fig. 6.6 Graph of $P_s$ comparing flat bottom and 10degree model .....	88
Fig. 6.7 power of PTO analysis model at 5 seconds .....	90
Fig. 6.8 power of PTO analysis model at 4 seconds .....	90
Fig. 6.9 Devices mooring according to water depth (Pizer D, 1993) .....	91
Fig. 6.10 Type of link chain .....	93
Fig. 6.11 Type of Strand rope (Harris, et al., 2004) .....	93
Fig. 6.12 Hydrodynamic analysis model for real sea model .....	96
Fig. 6.13 Calculating the center of gravity and mass property of a device through 3D modeling .....	97
Fig. 6.14 RAOs in sway(X direction), surge(Y direction), heave(Z direction) .....	98
Fig. 6.15 RAOs in pitch(RX direction), roll(RY direction), yaw(RZ direction) .....	98

Fig. 6.16 Time series data of pitching angle from 250s to 270s .....	99
Fig. 6.17 Time series data of surge motion from 250s to 270s .....	99
Fig. 6.18 Time series data of heaving motion from 250s to 270s .....	100
Fig. 6.19 1 point mooring specifications .....	101
Fig. 6.20 Sea test equipment and buoy of FWEC .....	103
Fig. 6.21 Anti-biofouling painting management .....	103
Fig. 6.22 Production of U-tank facility .....	104
Fig. 6.23 Graph of voltage according to rotation speed of 1kW generator at noload condition (Seoyoung tech. co) .....	106
Fig. 6.24 Graph of voltage according to current of 1kW generator at 400RPM (Seoyoung tech. co) .....	106
Fig. 6.25 Electric field design of real sea FWEC test facility .....	107
Fig. 6.26 Top side picture of FWEC test facility for real sea .....	108
Fig. 6.27 Photo of generator and sensors .....	108
Fig. 6.28 Power measuring device and control panel .....	109
Fig. 6.29 A system algorithm for RF model .....	110
Fig. 6.30 Data acquisition and monitoring program .....	111
Fig. 6.31 Wave monitoring buoy (Ocean E&G co.) .....	112
Fig. 6.32 Real time wave condition monitoring system .....	113
Fig. 6.33 Installation of safety buoy in real sea .....	114
Fig. 6.34 Installation of FWEC in real sea .....	115
Fig. 6.35 Photograph of real sea area installation .....	116
Fig. 6.36 Photo of the sea area test equipment taken on the land .....	116
Fig. 6.37 Wave height-period scatter plot (2016.1.1-2016.1.24) .....	118
Fig. 6.38 Wave height time series data (2016.1.1.-2016.1.24.) .....	118

## <국문초록>

# 유동해석 및 모델 시험을 통한 U-tube형 부유식 파력발전장치의 설계 및 성능 검증에 관한 연구

김 병 하

기계공학과  
한국해양대학교 대학원

## Abstract

파도에너지는 전세계에 약 2TW의 발전 가능성을 가지고 있어 신재생에너지 자원 중 가장 유망한 소스중에 하나이다. 해양에너지중의 하나인 파도에너지는 지진의 영향, 달의 인력, 태양의 중력장등에 의하여 발생된 에너지원으로 이러한 에너지원에 의하여 생성된 바람에 의한 영향을 가장 크게 받는다.

본 연구의 부유식 파력발전장치는 해양 파도의 파장보다는 작은 크기로 설계되었고 장치자체의 물리적 크기보다는 부유체의 동요를 증가시켜 보다 많은 파랑에너지를 흡수하는 것을 목표로 하였다. 이러한 파력발전장치의 설계 및 해양구조물의 설계에는 해역의 파도에너지 자원의 타당성 연구가 설계에 필수적이고 해양의 특성에 대한 철저한 이해가 필요하다. 이를 위하여 실험을 수행하고 실험장치의 설계를 위하여 실험 파랑 계측 및 해역의 분석을 수행하였다. 이를 통하여 설치지점에서의 파도가 가진 에너지 밀도 및 계절에 의한 영향, 파장, 해역의 특성, 수심에 의한 영향 등을 분석하였다. 파도의 중요한 매개변수는 파장, 파고, 주기 그리고 파도가 전파되어 나가는 수심이다. 그리고 이러한 매개변수를 통하여 파도의

특성을 예측하지만, 이러한 이론은 예상치이며 실제 해역에서의 파도의 특성은 크게 다를 수 있기 때문에 실험 및 계측이 필수적으로 필요하며 파력발전장치의 개발에 필수적인 요소이다. 또한 부유식 파력발전장치는 파도의 자유표면과 부유체의 상호작용을 통한 움직임에서 전기에너지를 생산하는데 에너지 변환과정은 반응지점에서 상대운동을 통하여 생산되는 힘 또는 토크로 정의할 수 있다. 또한 파도경로에 존재하는 모든 구조는 유체의 흐름에 영향을 주어 파도를 변환시키게 된다. 에너지 흡수와 파도-부유체의 상호작용에 크게 영향을 미칠 뿐만 아니라, 안정성(Stability), 고유진동수(Natural frequency), 계류특성(Mooring)에 영향을 미치게 된다. 이치적으로 파도에너지 및 조류, 바람, 태풍 등에 의한 영향으로 부유체에 부과된 하중에 견딜 수 있는 내구성을 확보해야 하는 것이 파력발전장치의 설계에 필수적인 요소라 할 수 있다. 에너지 흡수 응답률은 요동하는 파도의 주파수에 따라 달라지게 되고 파 주파수와 장치의 고유진동수를 일치시켜야 움직임이 최대가 되어 더 많은 에너지를 흡수할 수 있으며 부유식 파력발전장치의 최적 성능을 나타낼 수 있는 파도 주파수 대역은 좁기 때문에 이를 위한 부유체 응답 시험, 주파수별 PTO 성능시험, 조파수조 시험, 실험해역 시험이 필요하게 되고 일반적으로 EMEC에서 제시하고 있는 가이드라인에서는 파력발전장치의 개발에 있어서 적어도 4~5회 이상의 스케일 모델 시험, PTO 시험, 2~3회의 실험해역 시험을 권장하고 있다.

본 논문에서는 이를 총 3개 파트로 나누어 진행을 하였으며, PTO시스템 설계 및 시험을 수행하여 내부 터빈 성능 검증 및 유동해석 모델을 검토하고 성능곡선을 파악하여 장치의 크기 및 고유진동수에 맞는 최적 PTO 시스템을 설계하였다.

둘째로 부유체 응답성능을 파악하였으며, 응답성능시험 및 부유체 강제해석, 부유체 응답 해석, 대형 수조에서의 성능시험 등을 통하여 장치의 고유진동수 및 설치 수심, 계류시스템에 대한 해석을 수행하였다.

셋째로 내부 PTO시스템 해석 및 부유체 응답 해석을 통하여 설계된 실험해역 시험장치를 통하여 설계된 실험해역 시험장치를 이용하여 실험해역에서의 응답성능 및 성능을 계측하여 평가하였다.

**KEY WORDS:** Floating wave energy device 부유식 파력발전장치; Ocean energy 해양에너지; Performance analysis 성능해석; Performance test 성능시험; Real sea test 실험해역 시험.



## <영문초록>

# A study on the design and performance verification of U-tube type floating wave energy converter by CFD and model test

Kim, Byung Ha

Department of Mechanical Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

Wave energy is one of the most promising sources of renewable energy, with a potential of around 2 TW worldwide. Wave energy, which is one form of the marine energy, is the energy source mainly generated due to wind. But earthquakes and the gravitational fields of the moon and sun also have an effect on that.

The floating wave energy device of this study was designed to be smaller than the wavelength of the ocean wave and aimed at absorbing more wave energy by increasing fluctuation of the float rather than the physical size of the device itself. The design of wave power generators and the design of offshore structures needs a study on the validity of the wave energy resources in the subjected sea area and a thorough understanding of the characteristics of the ocean. To fulfill these requirements, test was performed and the wave measurement and



the analysis were done for the subjected sea area. Through this, we analyzed the energy density and seasonal influences of the waves at the installation site. The wavelength, the characteristics of the sea area, and the influence of the water depth was studied. Important parameters of the wave are the wavelength, wave height, wave period and water depth at which the wave propagates. These parameters are expected to predict the characteristics of the waves. However, these theoretical values may be different at real sea conditions. So an experimental study is essential for the development of wave energy devices. Floating wave energy devices produce electrical energy in motion through the interaction of the free surface of the wave and the float. The energy conversion process can be defined as the force or torque produced through relative motion at the eaction point. In addition, all the structures in the wave path affect the flow of the fluid and change the wave. This phenomena not only greatly affects the energy absorption and wave-float interaction, but also affects the stability, natural frequency, and mooring. It is also necessary to secure the durability to withstand the load imposed on the floater due to the wave, wind and other extreme conditions.

The energy absorption response rate depends on the frequency of the oscillation, wave period and the natural frequency of the device. It must be matched to maximize the movement to absorb more energy and the wave that can exhibit the optimum performance of the floating wave energy device.

Since the frequency band is narrow, a float response test, a PTO performance test, a wave tank test and an actual test in sea are required to keep device natural frequency within the frequency band. According to EMEC guidelines, at least 4-5 scale model test, PTO test, and two or three actual sea tests are recommended.

In this paper, divided into 3 parts and proceeded.

First, the design and test of the PTO system to examine the internal turbine performance and flow analysis model was done and the

performance curve was obtained to determine the optimal PTO system characteristics.

Secondly, the float response performance was analyzed and the analysis of the natural frequency, the installation depth and the mooring system of the device were carried out through the response performance test including the float rigid body analysis, the flood response analysis and the performance test in the large water tank.

Thirdly, the performance of the device was measured and evaluated by conducting a test in the sea.

**KEY WORDS:** Floating wave energy device 부유식 파력발전장치; Ocean energy 해양에너지; Performance analysis 성능해석; Performance test 성능시험; Real sea test 실험역 시험.



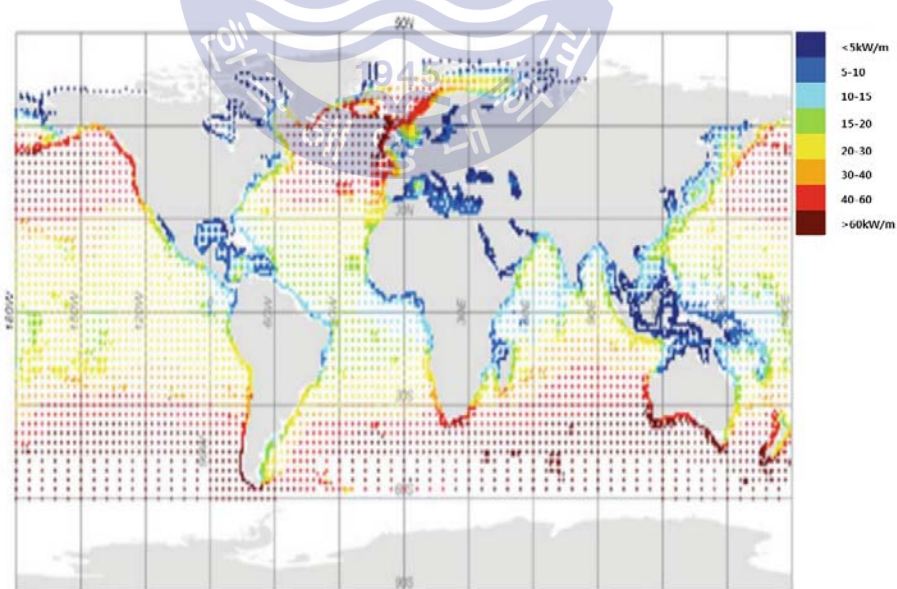
# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

전 세계적인 의제인 화석에너지 저감 및 기후변화에 대응하기 위하여 지속 가능한 에너지자원, 즉, 수력, 풍력, 태양광, 조류, 파력, 지열, 염도차발전 등 다양한 방식의 신재생에너지 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 세계 인구는 60억명을 돌파하였으며, 매년 1.7%이상의 인구가 증가하고 있다. 또한 급격한 산업화로 인한 환경문제, 화석연료의 고갈, 안정적인 에너지 공급에 따른 부정적인 영향으로 1997년 교토의정서가 채택이 되었고 2005년 발효되었다. 이에 따라서 1차적으로 감축의무가 있는 38개 선진 국가들은 2008년부터 2012년까지 온실가스 감축의무 받게 되었고, 2012년부터 개도국가지위인 대한민국도 감축의무를 이행하게 되었다. 최근 셰일가스 및 오일의 채취가 가능한 기술이 개발되면서 기존에 예측되었던 화석에너지 공급량이 일시적으로 증가하였지만 화석에너지의 고갈은 예견되어있다. 기술의 발달로 채취할 수 있는 화석에너지는 증가하였지만 지속적인 에너지사용량증가로 인하여 아마 10년 이상 100년 이내로 고갈 될 것이다. 여기서 신재생에너지 자원은 가장 명백한 답이 될 것이고, 이 에너지원은 지구가 존재하는 한 영원히 존재하는 에너지원으로 존재할 것이다. 전 세계적으로 자원의 불균등한 분배, 갈등이 야기되고 있으며 이에 다른 국가에서 공급되는 연료공급 의존도를 줄이고 그들의 주권과 정치적인 안정성을 유지할 수 있다. 신재생에너지는 매우 다양한 형태로 분산되어 있는데 이런 이유로 각 국가 별 자원 분포량, 지정학적 위치에 따른 재생에너지자원의 포트폴리오를 다양하게 개발할 필요성이 있다. 현재까지의 신재생에너지는 기술성숙도의 부족, 높은 발전 단가 등의 문제로 국가의 정책적인 지원에 의존하고 있으나 화석연료 가격의 증가, 기술 성숙도 증가, 규모의 경제로 인하여 조만간 상황이 호전될 것으로 예상된다. 최근에는 에너지 분포량이 풍부하고 시장잠재량이 큰 태양광, 풍력발전 분야의 집중적인 기술 개발과 대량양산을 통하여 경제성이 빠르게 개선되고 있으며 2009년 이후

블룸버그 뉴 에너지 파이낸스(2016)발표에 따르면 2016년 국제 평균적인 발전 단가가 kWh당 태양광 140원, 풍력 90원, 석탄 60원, 원자력 120원, 가스 60원 가량으로 평가하였고, 머지않은 2020년에는 태양광 80원, 풍력 70원, 석탄 80원, 원자력 130원, 가스 80원으로 화석에너지 발전단가와 동등하거나 더 낮을 것으로 예측이 되고 있다. 하지만 국내의 신재생에너지 발전은 풍력과 태양광으로 전력량을 대체하기에는 쉽지 않은 실정이다. 이는 좁은 국토 면적으로 인한 설치가능지역의 한계가 있으며, 자원량 또한 많지 않다. 이 때문에 3면이 바다로 이루어진 지리적 이점을 활용할 수 있는 해양에너지 및 해상풍력 발전에 관심을 기울이고 있다.

Fig.1.1은 Gunar Mørk, et al.(2011)에 의하여 전세계 파력에너지 잠재량을 분석하였으며 파력발전 잠재량의 경우 북유럽, 북미, 호주 등에 비교하여 우리나라의 파랑에너지 부존량이 4kW/m 정도로 적으나 일부 제주도나 동해안 등지는 비교적 파랑에너지 밀도가 10kW/m ~ 15kW/m로 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.



**Fig. 1.1** Annual global gross theoretical wave power for all world waves grid points worldwide (Gunar Mørk, et al., 2011)

이렇듯 국내는 비교적 파랑에너지 밀도가 상대적으로 높게 나타나는 제주도, 동해안등지는 파랑에너지 밀도가 경제성이 있는 것으로 파악되고 있으며 Song, et al.(2004)에 의하여 국내 파랑에너지 잠재량에 대한 분석을 수행하였다. Fig. 1.2는 1979년도부터 2002년까지의 파랑에너지 밀도에 대하여 계측데이터를 바탕으로 수치모델을 통해 국내 평균 파랑에너지밀도를 나타낸 그림이다. 이러한 데이터를 바탕으로 제주도 서남해 지역에 파력발전장치 실증시험장을 설치 중에 있다.

파랑에너지의 잠재량이 높은 국가의 경우 그러한 지리적 이점을 활용할 수 있는 해양에너지 및 해상풍력발전에 관심을 기울이고 있으며 파력발전의 경우, 북유럽, 북미, 호주 등 파랑에너지 부존량이 높은 나라를 중심으로 많은 연구들이 수행되고 있다. 선도국가들은 이와 같은 연구개발결과를 바탕으로 초기시장 선점을 위한 표준화에 대한 논의가 시작되고 있어 경쟁력있는 원천기술개발이 필요한 시점이다.

국내는 비교적 파랑에너지 밀도가 높지는 않지만 제주도, 동해안등지는 파랑에너지 밀도가 경제성이 있는 것으로 파악되고 있다. 이밖에 중공업이 발달한 국내산업과 연계되었을 시 큰 성장가능성을 가질 것으로 예상되고 있다. 이에 따라 해양연구원을 중심으로 학계, 중소기업 등이 연구개발에 나서고 있으며 향후 5년 이내에 상용화될 수 있는 기반과 원천기술 확보에 주력하고 있으며, 실증시험을 수행할 수 있는 바탕이 마련됨으로서 파력발전장치의 연구 및 개발이 더욱 가속화 될 것으로 예상된다.

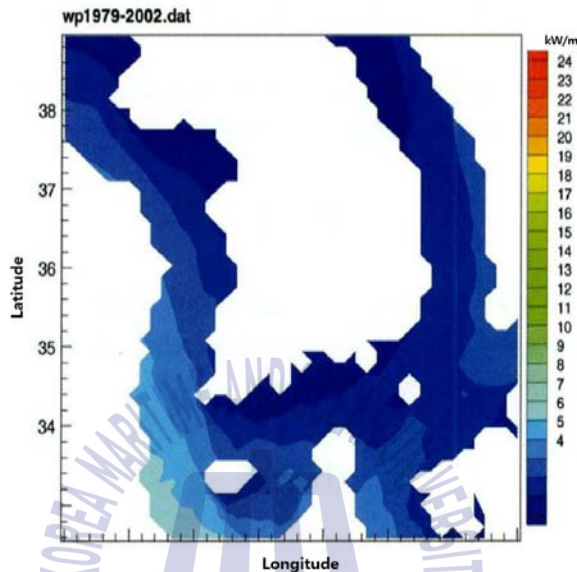


Fig. 1.2 Averaged wave power considering waves of 1m to 4m height only (Song, et al., 2004)

### 1.1.1 시장현황

파력발전 산업은 북유럽(영국, 덴마크, 포르투갈)국가가 주도적으로 기술개발에 나서고 있으며, 미국, 호주도 파력발전 기술에 대한 연구에 많은 투자를 하고 있다. 파력에너지 부존량은 국내 6.5GW, 세계 2.0TW로 예측되고 있으며, 글로벌 시장의 경우, 시장 성장 가능성이 높다. Global Data(2012)에서 예측한 파력발전분야 설비용량을 Fig. 3에 나타내었다.

현재 기술개발을 활발히 진행중인 나라를 중심으로 잠재 설비용량을 나타내었으며, 2015년을 기점으로 2020년 전 세계 설비용량을 1.35GW, 2025년에



는 3.0GW, 2030년에는 6.2GW로 예측을 하였다. 하지만 최근 셰일오일, 가스의 등장으로 유가가 하락되었고, 다른 신재생에너지 소스(풍력, 태양광)에 비하여 상대적으로 비싼 발전단가로 인하여 국가에 의한 투자가 아닌 민간 분야에서의 투자가 이루어지지 않아 시장성장의 걸림돌로 작용하고 있다. 또한 장치의 발전용량을 늘리기 위하여 대형화가 이루어지면서 MW이상의 장치들이 실증시험을 진행하고 있으나 높은 파랑에너지 밀도를 가진 근해에 설치하여야 용량을 확보할 수 있다. 하지만 해상에 송전망 설치하기 위한 비용이 증가하는 문제가 발생하였다. (World Energy Council, 2016)

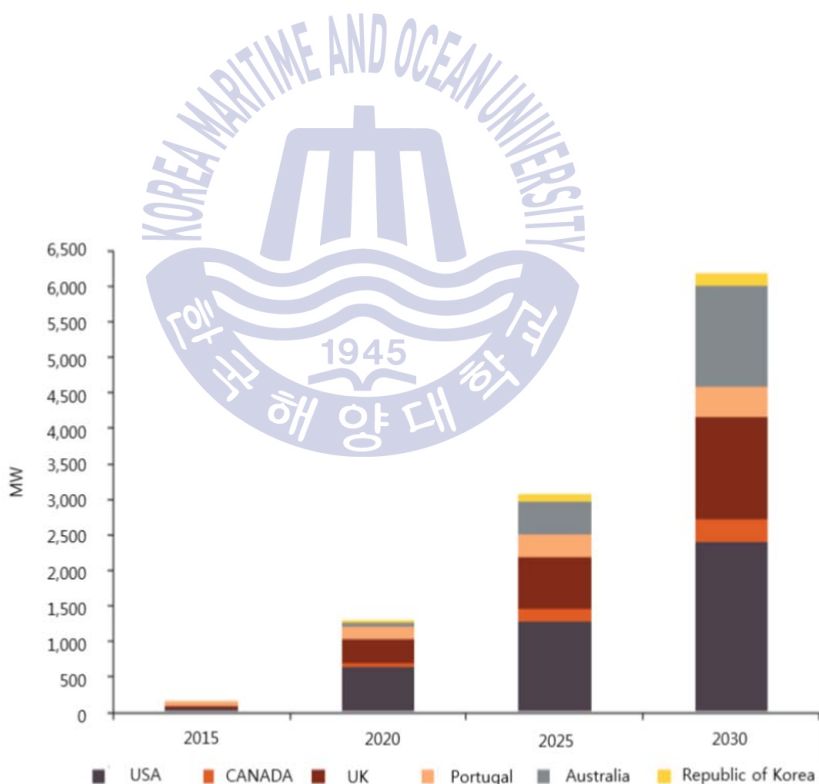


Fig. 1.3 Wave power market, global, installed capacity, MW, 2015~2030

(Global Data, 2012)

### 1.1.2 국외 기술개발 현황

파력발전 산업은 북유럽(영국, 덴마크, 포르투갈)국가가 주도적으로 기술개발에 나서고 있으며, 미국, 호주도 파력발전 기술에 대한 연구에 많은 투자를 하고 있다. 현재의 파력발전분야의 대표적인 기술개발 업체 및 장치를 Table 1.1에 나타내었다. 최근의 파력발전장치 기술성숙도(Technology Readiness Level)는 TRL 6(유사환경에서의 프로토타입 개발)으로 보이며, 풀 스케일 실증모델을 이용하여 실험을 진행하는 단계까지 도달한 것으로 보인다. 가장 높은 기술개발단계를 보였던 영국의 Ocean Power Delivery사의 Pelamis 파력발전장치가 내구성문제 및 낮은 경제성으로 지원이 중단되면서 파력발전 시장의 상용화가 좀 더 길어질 것으로 예상되고 있다. 최근에는 국가주도형 연구개발단계에서 민간시장의 자본참여를 통한 상업적인 요소를 개발하는 것에 중점을 두고 있는 추세이다.

Table 1.1과 Fig. 1.4에 나와 있는 대표적인 파력발전장치 이외에도 세계적으로 150종 이상의 다양한 파력발전장치가 연구 중에 있으며 생존성, 발전량, 시장성, 유지보수비, 제작단가 등에 의하여 소수의 파력발전방식만이 상용화로 나아갈 수 있을 것으로 보인다.

다양한 컨셉모델의 실증시험 및 검증단계는 상당수의 장치가 완료된 것으로 보이며, 이러한 다양한 발전방식 중 구동방식이 단순하고 일정이상의 효율을 보장할 수 있는 유압구동형 point absorber방식의 경우, 장치 설계 및 실증시험, 개발이 완료된 것으로 보인다. 이에 따른 최근의 해외의 연구 추세는 경제성 평가 및 LCOE(Levelized cost of energy)를 검토하여 경제성 및 단가 절감에 초점을 맞추어 풍력 및 태양광에 준하는 경제성을 확보하는 것에 초점을 맞추어 많은연구가 진행 중에 있으며, 파도에너지 밀도가 상대적으로 낮으나 그리드에 전력계통 연결이 쉽게 가능하고, 기술 난이도 및 유지, 설치운영에 강점을 가지는 착저형 및 고정식, 방파제 부착형 파력발전장치가 우선적으로 상용화로 나아갈 수 있을 것으로 예상되어 지고 있다.(IRENA, 2014)



**Table 1.1** List of wave energy R&D project in worldwide

Company (Nation)	Type	Capacity	Device Name	Remarks
AWS Ocean Ltd.(UK)	Floating	2.5MW	Archimedes Wave Swing(AWS)	Sea test(2004),
Ocean Power Tech.(USA)	Floating	50~500kW	Power buoy	Sea test(2006)
AquaEnergy Group(USA)	Floating	250kW	Aqua buoy	Sea test
Wave Star Energy(DK)	Fix	600kW	Wave Star	Sea testing(2009~2016)
Ocean Power Delivery(UK)	Floating	750kW	Pelamis	Sea testing(2010~2016), Agreement terminating
JAMSTEC(JP)	Floating	110kW	Mighty Whale	Sea test(2004)
WaveGen(UK)	Fix	500kW	LIMPET	Commercial plant(2000),
Wave Energy Center(PT)	Fix	400kW	Pico Plant	Commercial Plant (2005)
Wave Dragon ApS(DK)	Floating	20kW	Wave Dragon	Sea test (2006), 4MW commercial Plan



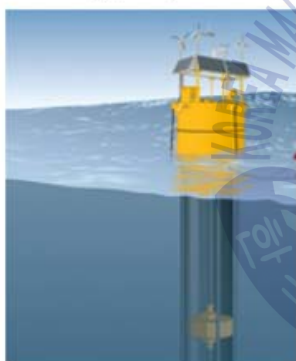
Archimedes Wave  
Swing(AWS) -2.5MW



Power Buoy(OPT)  
-150kW



Pico Plant(WavEC)  
-400kW



Aqua BuOy(AEG)  
-250kW



Wave Star(WSE)  
-600kW



Wave Dragon  
(WavedragonApS) -20kW



Pelamis P1(OPD)  
-750kW



Mighty Whale(JAMSTEC)  
-110kW



Weptos(Weptos)  
-250kW

Fig. 1.4 Various prototype wave energy converters in worldwide

### 1.1.3 국내 기술개발 현황

OES Annual Report(2016)에 국내 파력발전 연구개발 내용이 포함되어 있으며, Table 1.2에 최근의 국내 파력발전장치 연구개발 수행내역을 나타내었으며 Fig. 1.5에 국내 대표적인 파력발전 실험장치를 나타내었다. 또한 국내 연구가 활성화 되어가고 있으나 실험의 어려움으로 인하여 테스트베드의 필요성이 제기되었고 이에 따라 해양수산부의 지원으로 KRISO가 파력발전장치 개방형 테스트베드 구축사업을 수행하고 있다. 제주 서남해에 2016년 5월부터 착공하여 수심에 따른 5개 라인의 해저그리드와 5MW의 해상변전설비를 구축하고 있으며 2019년 12월 설치가 완료될 예정이다. 제주 남서 해안 1.5km지점에 2016년 7월 준공된 500kW급 용수 OWC파력 발전 플랜트가 실증시험을 수행하고 있으며, 육상의 계통과 연결되어 발전을 수행하고 있다.

2010년도 이후, 국책연구소 이외의 업체도 파력발전장치 개발 사업에 뛰어들고 있으며, 대표적으로 (주)인진과 화진기업이 있다. 인진은 Onshore에 기반한 부유체와 연결된 케이블을 이용하여 육상에서 발전하는 방식을 취하고 있다. Onshore에 위치하여 파랑에너지 밀도는 작으나 해상케이블을 설치할 필요성이 없고 설치가 간편한 특징을 가지고 있다.

2015년 제주도 방과제에 135kW급의 실증플랫폼을 설치하여 계통과 연결하여 운전 중에 있다. 국내의 경우, 파랑이 상대적으로 높지 않기 때문에 해상풍력 플랫폼, 특수목적용 장치와 결합한 장치의 상용화가 가장 우선적으로 이루어 질 것으로 예상된다.

국내연안의 경우, 등부표, 해상플랫폼, 양식장 등 해상에서 전력을 필요로 하지만 독립전원을 필요로 하는 지역이 경제성이 높은 것으로 보인다.

**Table 1.2** List of wave energy R&D project in Korea

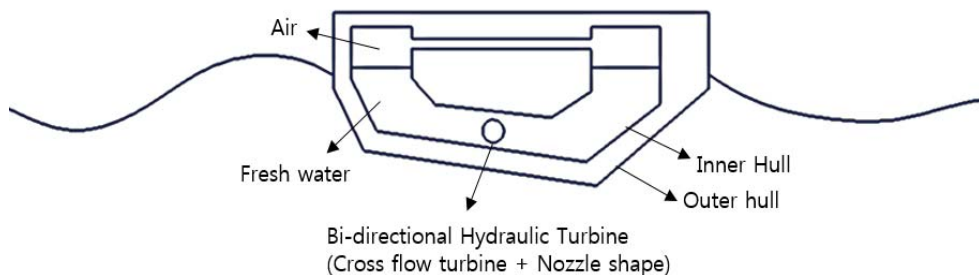
Company	Type	Capacity	Device Name	Remarks
KRISO	Fix (OWC)	2 X 250kW	Youngsoo OWC	Pilot plant (2015~)
Gyungju Univ.	Floating (point absorber)	-	-	Prototype test (2013)
KRISO	Floating (Pendulum)	300kW	FPWEC	Construction(2016~2017)
Hwa jin co.	Fix (Jack-up)	30kW	-	Sea test(2016)
iKR	Floating (OWC)	10kW	Yoyo Oscillator	Sea test(2016)
KPM	Floating (point absorber)	50W	-	Sea test(2016)
ENGINE	Fix(land)+ Floating(buoy)	135kW	INWave	Pilot plant (2015~)



**Fig. 1.5** Various Prototype wave energy converters in korea

## 1.2 연구방법 및 연구목표

부유식 가동물체형 파력발전장치는 다양한 작동방식을 가지고 있다. 일반적으로 OWC방식을 이용한 공기터빈을 이용한 방식과 유압 피스톤을 이용한 방식이 주류를 이루고 있다. 이러한 부유식 파력발전장치에 필수적인 요소는 생존성, 발전용량, 유지보수, 제작비용이라 할 수 있으며, 이러한 문제점들에 대한 다양한 접근 방식이 필요하다. 부유식 파력발전장치의 설계는 크게 PTO(Power take off)시스템 설계와 수동력학적 설계, 계류시스템 설계, 전력 시스템 설계, SCADA(Supervisory control and data acquisition)시스템 등으로 나눌 수 있다. 본 연구를 위한 파력발전장치 개념은 Fig. 1.6에 나타내었다. 기존의 파력발전장치의 해상상황에서 가장 큰 문제를 발생시키는 생존성과 유지관리가 간편한 파력발전장치 개념으로 2중선체로 구성하여 외부선체내부에 U자 형태의 내부 선체를 내장시켰으며 내부선체에는 청수가 채워져 있으며, 선체의 동요에 따라 유체가 이동하게 되며, 이 에너지를 양방향 Cross-Flow터빈을 이용하여 기계적인 에너지로 변환시키는 방식을 가지고 있다. 여기에 활용된 양방향 터빈은 Choi, et al.(2009), Kim, et al.(2009) 등에 의하여 연구되어진 터빈을 활용하였고 횡류터빈의 특성인 저속, 넓은 가동영역을 가져 불규칙한 해양의 상태에 따른 출력의 불균일한 상황에서 높은 성능을 낼 수 있다. 또한 선체를 이중으로 배치하여 내부에 PTO시스템이 설치되기 때문에 해수에 의한 부식, 부착물문제에서 해방될 수 있고, PTO시스템의 파손문제에서도 자유롭다. EMEC(2009)에서 발간한 “Marine Renewable Energy Guideline”에 파력발전시스템 개발단계를 Table 1.3과 같이 정의하였다. Phase 1에서는 Concept모델의 성능분석, 최적화가 이루어지며, Phase 2에서는 계류시스템, PTO시스템 등을 모델테스트를 통하여 검증하는 단계이며, Phase 3은 실제 해역시험을 통한 검증단계이다. 본 연구에서는 Phase 1 개념 설계부터 Phase 3까지의 파력발전장치의 설계, 수력학적 해석, 스케일 시험, 실험해역 시험 등을 통한 부유식 파력발전장치 성능평가를 목적으로 본 연구를 수행하였다.



**Fig. 1.6** Concept graphic of FWEC(Floating Wave Energy Converter) with double hull structure

**Table 1.3** Technical output of phases (EMEC, 2009)

	Phase 1 Validation model (lab.)			Phase 2 Design model(lab.)	Phase 3 Process model	Phase 4 Prototype	Phase 5 Demonstration
	Concept	Performance	Optimization		Sea trials		
Model	<ul style="list-style-type: none"><li>- Idealized with quick change options</li><li>- Simulated PTO</li><li>- Std mooring and mass distribution</li></ul>			<ul style="list-style-type: none"><li>-Final design (internal view)</li><li>-Mooring layout</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Full fabrication</li><li>-True PTO and elec. generator</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Grid control electronics</li><li>Emergency response</li></ul>	First Fully operational device
Objectives	<ul style="list-style-type: none"><li>-Concept validation</li><li>-performance variables</li><li>-RAOs</li><li>-PTO and mooring characteristics</li><li>-Diffraction and radiation</li></ul>			<ul style="list-style-type: none"><li>-Real sea</li><li>-Performance</li><li>-Direction sensitivity</li><li>RAOs</li><li>Seakeeping</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Verify phase1</li><li>-Active control</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Wave-wire performance</li><li>-Survival and seakeeping</li></ul>	
Measurement	-Motion, forces, waves, power						
Specialize	DoF(2D)	<ul style="list-style-type: none"><li>-Short crest seas</li><li>-Angled waves as required</li></ul>	Storm seas	PTO bench test PTO and generator	<ul style="list-style-type: none"><li>Survival forces</li><li>Salt corrosion</li><li>Marine growth permissions</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Quick release connections</li><li>Service ops</li></ul>	Solo of small array (upgrade)
Numerical methods (computer)	<ul style="list-style-type: none"><li>-Hydrodynamic, numerical frequency domain to solve the model</li></ul>			<ul style="list-style-type: none"><li>-Finite waves applied damping</li><li>-Multi freq inputs</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Time domain response model and control strategy</li><li>-Naval architects design codes for hull, mooring and anchorage system</li><li>-Economic and business plan</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Array interaction</li><li>Economic model and Electrical stab.</li></ul>	Int. Market projection for device sales



### 1.2.1 PTO시스템 설계

Fig. 1.7에 PTO(Power Take Off)시스템 설계 프로세스를 나타내었다. 기본적인 개념모델의 PTO시스템의 검증을 위하여 유동해석을 통하여 기본 모델의 설계를 진행하였고, PTO시스템의 검증을 위하여 4:1 PTO성능시험모델을 제작하여 PIV계측, 토크, 터빈 회전수, PTO성능, 플라이휠 적용에 따른 성능을 검증하였으며, 시험모델의 유동해석을 통하여 PTO시스템 유동해석기법을 검증하였다. 검증된 유동해석기법을 이용하여 PTO시스템 파라미터를 최적화하였고, 발전기 선정, 출력을 예측하여 파랑수조 시험 모델, 실험역 성능시험 모델을 설계하였다.

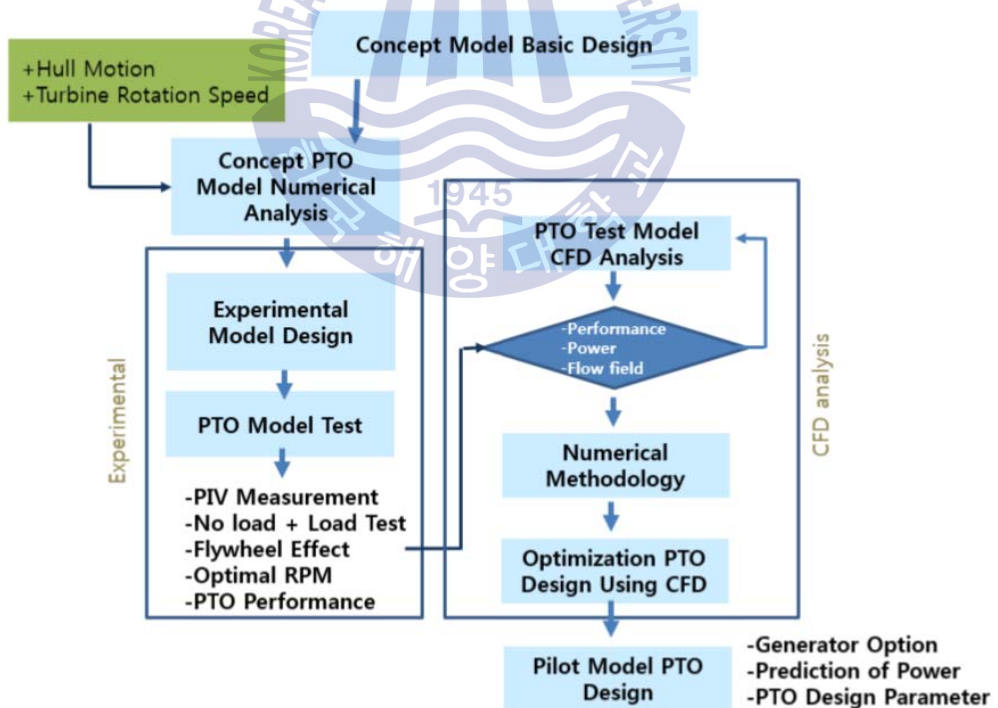


Fig. 1.7 Design methodology of PTO system

## 1.2.2 부유체 및 계류시스템 설계

부유체 응답성능 및 계류 해석을 위하여 1.2.1에 설계된 PTO형상 모델링이 필요하다. 2중으로 구성된 선체 내부에 PTO시스템이 위치하기 때문에 1차적으로 PTO 모델 형상의 무게중심, 관성모멘트, 내부선체 내의 청수의 양, 재질을 고려한다. 이에 따른 외부선체의 형상은 1차적으로 PTO시스템을 감쌀 수 있는 형태가 되어야 하며, 장치의 평형성을 고려하여야 한다. 2차적으로 파력발전장치의 고유진동수, 목표해역의 파랑조건에 적합한 응답성능을 가져야 한다. Fig. 1.8에 본 파력발전장치의 설계 방법을 도식화 하였다. 1차적으로 설계된 기본 형상을 이용하여 응답성능을 계산하고, CFD를 이용하여 강체-유체 연성해석을 수행하여 장치의 최종 출력 및 효율을 확인하였다. 부유체의 형상검증을 위하여 기본 모델에 대하여 1:20스케일의 수조시험을 진행하여 부유체의 응답성능을 확인하고, 이에 따라 선정된 부유체 형상에 대하여 시간 응답 해석 및 계류해석을 수행하여 계류방식을 선정하였다.

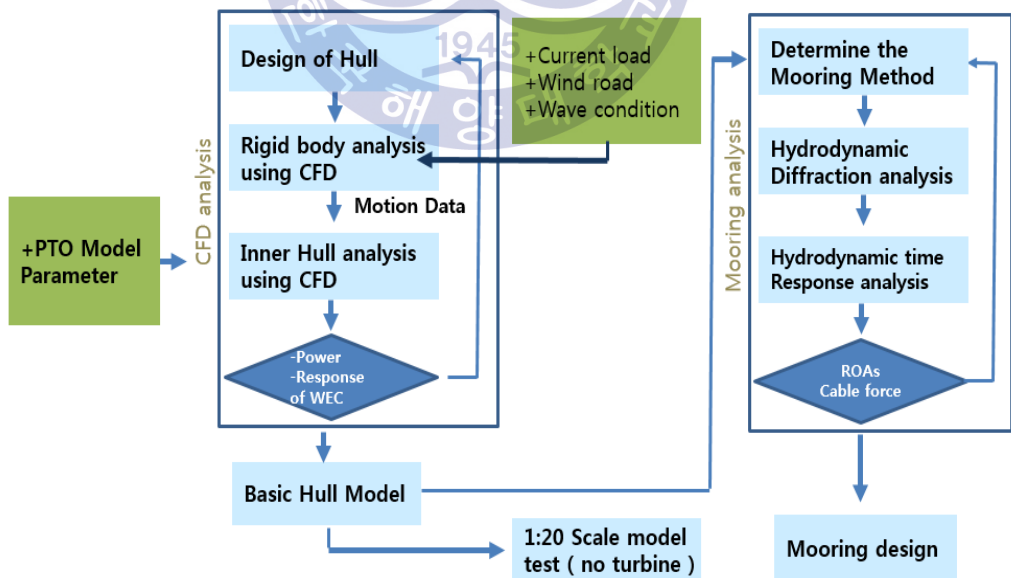


Fig. 1.8 Design methodology of hydrodynamic and mooring system



### 1.2.3 스케일 모델 테스트 및 실해역 시험 진행

Fig. 1.9에 대형수조 스케일 모델 시험 진행 및 실해역 시험의 진행도를 나타내었다. 앞선 PTO시험 및 해석, 부유체 응답성능 및 해석을 바탕으로 1:4스케일 모델의 대형 수조 시험을 진행하였으며, 대형수조 모델의 경우 계류장치부터 내부 PTO시스템까지 장착하여 파랑 수조시험을 진행하였다. 본 파력발전장치의 경우 작은 스케일 모델은 내부 터빈 및 세밀한 장치의 제작이 어렵기 때문에 대형의 조파수조상에서 상대적으로 큰 스케일 모델은 장치의 구현 및 용량, 데이터 신뢰성이 뛰어나기 때문에 파력발전장치 개발에 필수적으로 수행하여야 한다. EMEC(2010)에서는 최소 4회 이상의 시험 및 소형 스케일의 해역시험, Pilot장치의 해역실험, 상용화 단계로 진행을 권장하고 있으며, 이는 다양한 파랑조건 및 해역시험, 성능 계측, 생존성 등을 판단하기 위함이다. 본 연구에서의 해역시험 모델의 경우 1kW 스케일 모델을 설치하여 시험을 수행하였으며, 사이트의 선정, 사전 파랑 조사, 사이트 인허가, 설치를 위한 안전성 검토 작업을 수행하여 설치하였으며, 소형 파랑 수조 시험을 통하여 장치의 길이와 파랑의 파장의 비에 맞는 수심을 선정하여 실해역 시험장치의 시험을 진행하였다.

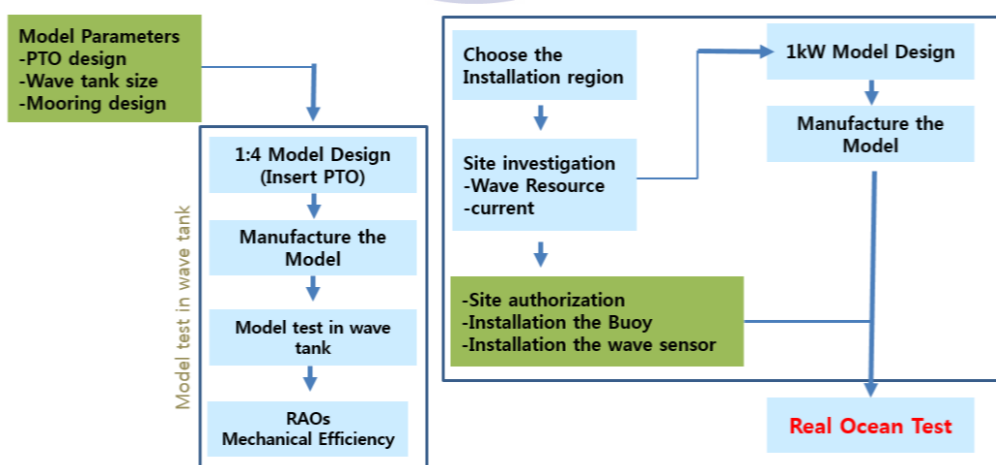


Fig. 1.9 Flow chart of experimental

## 제 2 장 파력발전장치 수학적 모델링

### 2.1 부유체의 수동력학적 수치모델

본 파력발전장치는 2중 선체로 구성되고 내부에 큰 U자형의 탱크를 가지고 있는 부유체이다. 이러한 U자형 탱크를 가진 파력발전장치 수치모형은 Fonseca et al.(2012)에 의하여 제안되었으며, “UGEN” 이라고 하는 공기터빈을 이용한 파력발전 장치를 개발 중에 있다. 파랑에 의한 부유체의 모션에 의하여 내부 U자형 탱크가 진동하며 내부에 채워진 물의 수주가 변경되게 되며, 이러한 수류의 움직임으로 양방향 수력터빈(cross-flow)터빈을 작동시켜 발전을 수행하게 된다. 본 파력발전장치는 Slack-mooring형태의 계류시스템을 가지고 있으며 선체는 파랑에 의한 외부선체의 동요 및 선체내부에 위치한 U-tube형태의 탱크에 청수가 채워져 있으며 외부선체의 동요에 따른 내부 U-tank의 진동에 따른 수주의 변화에 따른 내부진동, 즉 두 개의 진동수를 가지고 있다. 해석을 위해서는 외부진동과 내부진동을 분리하여 계산을 수행하는 것이 합리적이다. 시스템의 선형 동역학에 따른 부유 선체의 모션은 4개의 주파수 영역으로 나타낼 수 있으며, Fig. 2.1에 그림으로 나타내었다.

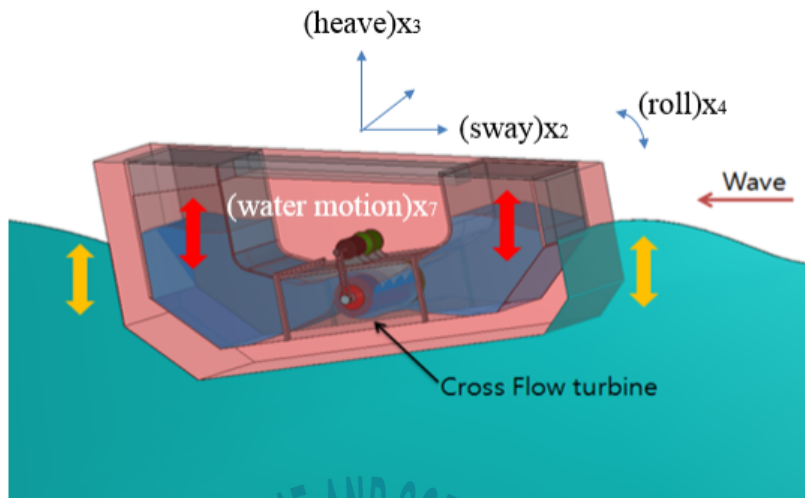


Fig. 2.1 Perspective view of FWEC and the degree of freedom of the FWEC

파랑에 의한 외부선체 주파수 도메인은 Sway( $x_2$ ), Heave( $x_3$ ), Roll( $x_4$ )로 나타낼 수 있으며, 탱크내 청수의 운동( $x_7$ )으로 나타낼 수 있으며, 파랑을 흡수할 수 있는 장치의 주된 외부선체 자유도는 Rolling이며, 파랑에 적합한  $x_4$  즉, 유진동수를 가지는 선체의 설계가 중요하다.

### 2.1.1 파력발전장치의 수동력학적 이론

파력발전장치의 수동력학적인 특성은 일반적으로 파도에너지로부터 파력발전장치의 기계적인 에너지로 변환하는 것에 관여된다. 본 절에서는 부유식 파력발전장치에 가해지는 수동력 식을 소개한다. Fig. 2.2에 유체와의 접촉으로 발생하는 부유체의 운동에 대하여 나타내었고 구속조건에 따라 다를 수 있지만 본 파력발전장치와 같이 자유 계류된 장치의 경우에는 6자유도의 운동을 가지게 된다.

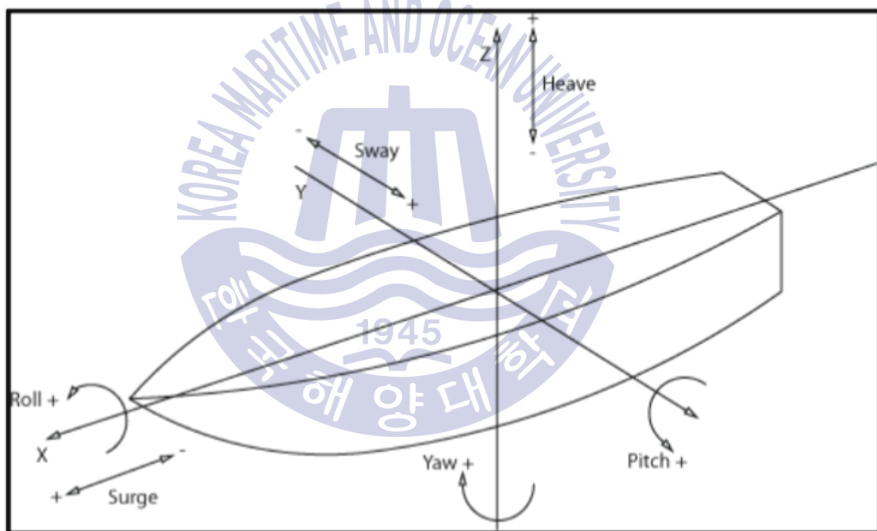


Fig. 2.2 Movements of a floating body in contact with a fluid

부유체의 표면에 가해지는 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

첫째로, Diffraction Forces(회절력)이며 부유체에 입사한 파랑이 고정된 상태의 부유체에 부딪혀 유도되어지는 힘과 관련된다.

둘째로, Radiation Forces(방사력)이다. 선체가 부유운동을 하게 되면 주위 유체에 의하여 압력 변동이 일어나고 이에 따라서 선체 주위의 파도가 생기

게 된다. 이 파랑의 압력장이 선체에 가하는 힘이다.

셋째로, Hydrostatic Forces(정수압)이다. 유체가 물에 잠긴 물체에 수직한 방향으로 작용하는 압력이다. 정수압은 잠긴 물체의 깊이와 유체의 밀도에 따라 달라진다.

단순한 형태의 부유식 파력발전장치(수직한 방향의 1자유도를 가진 경우)의 경우 운동방정식은 식(2.1)과 같이 주어진다.

$$(m + A) \cdot \ddot{x} = f_b - B\ddot{x} - \rho g x S + f_{PTO} \quad (2.1)$$

여기서,  $m$ 은 물체의 질량,  $x$ 는 수직좌표,  $f_b$ 는 수직성분의 회절력,  $f_{PTO}$ 는 PTO메커니즘으로 인한 힘의 수직성분,  $A$ 는 물에 의한 관성의 부가질량으로 인한 수동력학적인 계수,  $B$ 는 파도와 부유체 사이에 발생하는 평균에너지와 관련된 방사 감쇠 계수,  $w$ 는 각속도,  $g$ 는 중력가속도,  $S$ 는 파력발전장치의 수면 면적이다.

만약 PTO(Power Take-off)시스템이 선형감쇠시스템으로 표현될 수 있다고 하면 식(2.2)와 같다.

$$f_{PTO} = -C\dot{x} - kx \quad (2.2)$$

위 식에서  $C$ 는 선형 감쇠 계수이며,  $k$ 는 선형 스프링 계수이다.

$k=0$ 인 방정식으로 가정하여 식(2.1)과 식(2.2)를 고려하면 파도의 주어진 주기에 따른 최적의 감쇠 시스템을 계산할 수 있다. 하지만 실제 파도의 경우 정현파가 아닌 불규칙 파랑이기 때문에 이러한 최적화 방법은 완전할 수 없다.

본 파력발전장치와 같은 자유롭게 부유해있는 파력발전장치는 장치의 전방에서 입사하는 파랑에 대한 부유체의 응답을 4자유도(sway, heave, roll, water motion in the u-tank)를 가지는 모델로 단순화 시킬 수 있다.

부유체 운동 방정식은 식(2.3)에 나타내었다.

$$(m_{kj} + a_{kj})\ddot{x}_{kj} + b_{kj}\dot{x}_{kj} + c_{kj}x = F_k^E \quad (2.3)$$

질량 계수는  $A_{kj}$ , 댐핑 계수는  $B_{kj}$ , 복원 계수는  $C_{kj}$  이다. 선체 좌표계의 자유도(6 자유도)는 ( $k=1,2,3,\dots,6$ )로 나타내었고, 선체내부의 유체의 상하 움직임은  $k=7$ 로 나타내었다. 강체의 자유도는 ( $x_j, j = 1,2,\dots,6$ )이고,  $F_k^E$  는 파동을 일으키는 파랑의 힘이다.



## 2.1.2 파력발전장치 U-탱크 내부의 수학적 모델링

Newman, et al.(2004)와 Lloyd (1989)에 의하여 본 장치와 유사한 형태의 선박 진동 감쇠에 적용되는 U자형 형태의 관 내부에 유체의 흐름에 대한 연구를 수행하였다. U-탱크에 부가되는 운동량( $x_7$ )은 1차원 Euler's 방정식을 기반으로 단순하게 표현될 수 있다. U 탱크 내부의 유체의 지배 방정식을 식(2.4)과 같이 나타내었다.

$$A_{77}\ddot{x}_7 B_{77}(\dot{x}_7 - \dot{x}_4) + C_{77}x_7 + A_{72}\ddot{x}_2 + A_{74}\ddot{x}_4 + C_{74}x_4 = 0 \quad (2.4)$$

여기서 Fig. 2.3은 선체 내부의 U자형 탱크의 치수를 나타내었다. 내부 관의 높이는  $h_r + h_d/2$  이고, U자관의 폭은  $w_r$ , 터빈이 설치된 중간 영역의 관의 폭은  $h_d$ , 탱크 내부의 수주차에 대한 기울기는  $x_7$ 이다.

여기서 내부 유체의 질량은 다음과 같이 식(2.5)로 나타낼 수 있다.

$$A_{77} = Q_t W_r \left( \frac{w}{2h_d} + \frac{h_r}{w_r} \right) \quad (2.5)$$

내부유체의 댐핑 계수 식(2.6)으로 표현된다.

$$B_{77} = 2zQ_t \sqrt{w_r g \left( \frac{w}{2h_d} + \frac{h_r}{w_r} \right)} \quad (2.6)$$

에서  $z$ 는 유량 감쇠계수를 나타내며,  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다.

복원계수는 식(2.7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{77} = C_{74} = C_{47} = Q_t g \quad (2.7)$$

여기서, Symmetric한 형상이기 때문에  $A_{72}$  과  $A_{27}$  은 동일하고  $Q_t$  와 같다.

또한  $A_{74}$  과  $A_{47}$  또한 동일하며,  $A_{47}$  은 식(2.8)와 같다.

$$A_{47} = Q_t (r_d + h_r) \quad (2.8)$$

내부선체의 매개변수를 유체의 밀도에 관한 식으로 나타내면 식(2.9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_t = \frac{\rho_w w_r w^2 L_t}{2} \quad (2.9)$$

여기서  $\rho_w$  는 내부 청수의 밀도를 나타낸다.

식(2.4)에서 식(2.9)까지의 계산 값을 이용하여 각각의 값으로부터 내부유체의 각속도인  $\dot{x}_7$  을 구할 수 있고, 이를 이용하여 유체의 속도  $v$  를 구할 수 있다.

최종적으로 내부 U-탱크에 흐르는 질량 유량을 식 (2.10)과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{m}(t) = b h_d v \quad (2.10)$$

여기서,  $b$ 는 U-탱크의 폭이다.

하지만 내부 U-탱크 중단에 설치된 수류터빈이 유량감쇠효과를 가지고 있기 때문에



유량감쇠계수( $\beta$ )를 적용하면 식 (2.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}(t) = bh_d v \beta \quad (2.11)$$

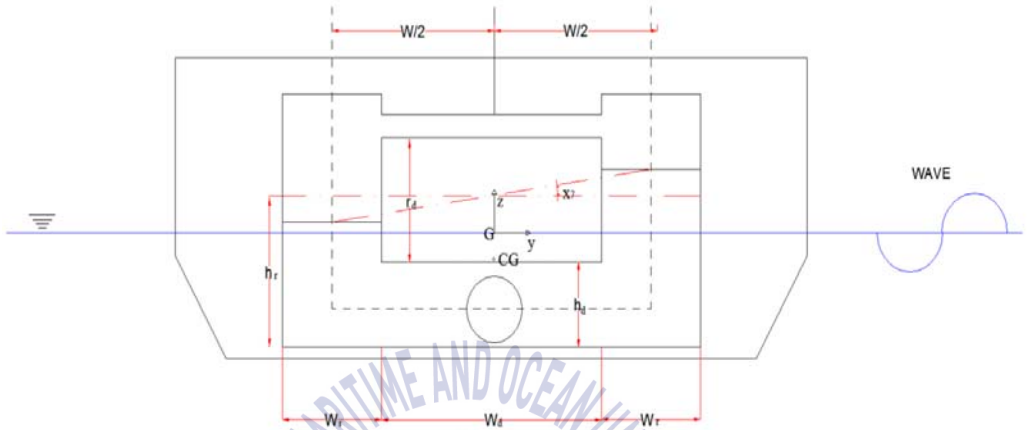


Fig. 2.3 U-shape tank dimension, passive U-tank mathematical model  
(Lloyd's method, 1989)

### 2.1.3 파력발전장치 양방향 수력터빈 수학적 모델링

수력터빈의 수학적 모델링을 위해서는 터빈 전후단의 압력차( $p(t)$ ), 식 (2.11)을 통하여 도출한 유량( $Q(t)$ )에 관계된다. 이에 더하여 터빈의 유량( $Q_t$ ), 터빈 출력( $P_t$ )에 대한 터빈의 특성이 필요하다.

터빈의 출력에는 작동유체의 밀도( $\rho_t$ ), 터빈의 회전수( $N$ ), 터빈의 직경( $d_t$ )이 연계되어 진다. 수력터빈은 압력차(수두)와 질량사이의 선형 관계에 따라 식 (2.12)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}(t) = \frac{k_t d_t}{N} p_t \quad (2.12)$$

## 2.1.4 파력발전장치 수학적 모델링

파력발전장치의 수학적 모델링을 위하여, roll, heave, sway, 탱크내부의 물의 움직임에 대한 식(2.1)~식(2.11)까지의 식과 수류터빈 방정식(식(2.12))을 결합하여 파력발전장치를 다음과 같은 방정식으로 나타내었다.

$$(M + A_{22})\ddot{x}_2 + B_{22}\dot{x}_2 + A_{23}\ddot{x}_3 + (A_{24} - M_{zG})\ddot{x}_4 + B_{34}\dot{x}_4 + A_{27}\ddot{x}_7 + pA_t = F_2^E(t) \quad (2.13)$$

$$A_{32}\ddot{x}_2 + B_{32}\dot{x}_2 + (M + A_{33})\ddot{x}_3 + B_{33}\dot{x}_3 + C_{33}x_3 + (A_{34} - M_{yG})\ddot{x}_4 + B_{34}\dot{x}_4 + C_{34}x_4 = F_3^E(t) \quad (2.14)$$

$$(A_{42} - M_{zG})\ddot{x}_2 + B_{42}\dot{x}_2 + (A_{43} - M_{yG})\ddot{x}_3 + B_{43}\dot{x}_3 + C_{43}x_3 + (I_{44} + A_{44})\ddot{x}_4 + \dots \\ \dots B_{44}\dot{x}_4 + B_{44ext}\dot{x}_4 + C_{44}x_4 - A_{47}\ddot{x}_7 + C_{47}x_7 - pA_t d_t = F_4^E(t) \quad (2.15)$$

$$A_{77}\ddot{x}_7 + C_{77}x_7 + A_{72}\ddot{x}_2 + A_{74}\ddot{x}_4 + C_{74}x_4 - pA_t w = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{v_0}{c_a} \dot{p} + \frac{k_t d_t}{N} p - A_{tk\phi_a} (\dot{x}_7 - \dot{x}_4) \quad (2.17)$$

이 수식은 운동 방정식을 주파수 영역에서 풀어 운동 전달을 얻을 수 있다. 이 방정식은 U-탱크 내부의 슬로싱현상을 고려하지 않고 내부표면은 균일하다고 가정한다. 또한 내부 유동장의 변화에 따라서 무게중심의 이동은 고려하지 않았으며, 이는 내부 유체의 이동에 따른 부유체의 응답성능 변화는 크지 않을 것으로 예상하였다.

### 2.1.5 파력발전장치 Rolling 고유진동수

부유식 파력발전장치는 파랑에너지로부터 높은 에너지를 흡수하기 위해서는 다음과 같은 몇가지 중요한 매개 변수를 고려하여야 한다.

- 부유체의 형상

(Hull형상의 모멘트, 복원력, 부가질량(부가관성), 방사, 감쇠)

- 터빈 효율

(댐핑 효과, 터빈 회전수, 터빈의 초기 관성, 터빈의 직경, 터빈 중심위치)

- Roll 관성 모멘트

(무게 중심 위치( $z_g$ ), 무게중심에 따른 Roll 관성 모멘트( $I_{44}$ ))

본 파력 발전장치의 설계를 위하여 가장 우선적으로 고려되어야 할 문제는 부유체-파랑의 고유진동수를 맞추는 문제라고 할 수 있다. 설계되어진 파력발전장치는 6자유도의 운동 중 Rolling운동의 고유진동수를 맞추어야 높은 에너지 흡수율을 나타낼 수 있다.

Rolling 고유주기의 특성 식(2.18)은 다음과 같다.

$$T_{n,4} = 2P_t \sqrt{\frac{I_{44} + A_{44}}{\rho_w z_g (I_{xx}/\nabla + z_b - z_g)}} \quad (2.18)$$

여기서,  $I_{44}$ 는 관성모멘트,  $A_{44}$ 는 부가관성, 물의 밀도( $\rho_w$ ), x축의 2차관성모멘트( $I_{xx}$ ), 부피( $\nabla$ ), 부력 중심의 수직한 위치( $z_b$ ), 무게 중심의 수직한 위치( $z_g$ )이다.

## 제 3 장 실험역 시험 위치 선정 및 파랑계측

### 3.1 설치해역 선정

동삼동 한국해양대학교 옆에 위치한 하리항은 소규모 어항으로서 방파제 (414m) 등의 어항기본시설이 위치하고 있으며 하리항은 부산 연근해에서 조업하는 소형어선들의 어업기지로 활용되고 있다. 그 옆에 위치한 한국해양대학교 남단의 장치설치위치(Fig. 3.1, Fig. 3.2)는 영도조도 남단 해변 호안 앞 120m지점이며 2km동쪽으로 부산항 항만의 출입구인 조도 방파제가 위치되어 있다. 설치해역의 수심은 7~12m이며, 서북쪽 500m 지점에 암초구역이 있다. 영도조도(한국해양대학교 부지) 자갈마당의 위치는 부산항만 입구 방파제와 근접하여 있지만 수심이 낮아 대형선박의 입출입이 금지되어 있으나 소형어선들의 어업활동은 이루어진다. 부산구항만 방파제에서 1km 가량 떨어져 있어 인근해역의 대형선박의 출입이 잦지만 설치위치의 경우, 대형선박의 출입은 드물다. 동삼어촌계와 동삼해경파출소에 문의 결과 당해 해역의 선박의 입출입이 타 지역에 비교하여 적은 편으로 위치선정시 동삼어촌계와 해경에 문의하여 위치 선정을 진행하였다. 또한 근처해역에서 2010년에 Fig.3.3에 나타난 OWC발전 방식이 적용된 하이브리드 발전방식(Wave-Wind-PV)의 등부표 시험장치(Oh, et al., 2013)가 3기 설치되어 시험 장소로 이용되었다.



Fig. 3.1 Pilot chart (25000:1)

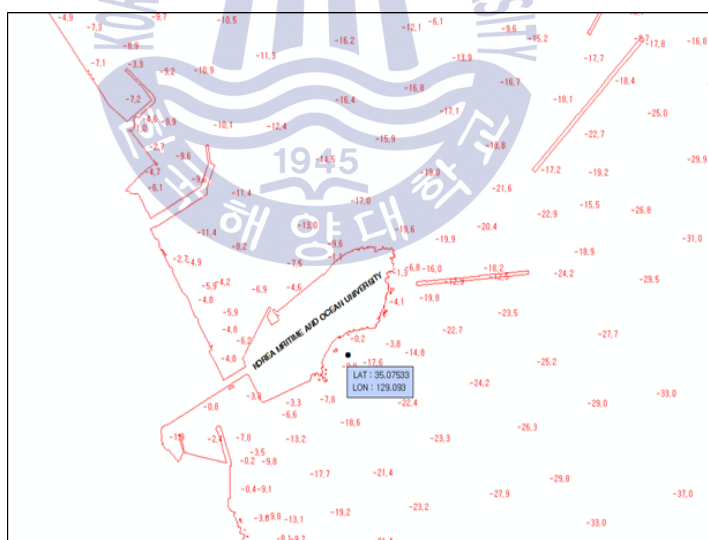


Fig. 3.2 Numerical water depth map (25000:1)

-Water depth : 7m



Fig. 3.3 Hybrid generating buoy (Oh, et al., 2010)

### 3.2 설치해역 기상 조건 검토

부산 연안지역에서는 바람은 연중 남서풍과 북동풍이 가장 탁월하며 겨울철에는 북서풍이 우세하지만 서~동북동풍에 이르는 광범위한 바람도 나타난다. 봄철에는 잦은 기압골의 통과로 남~남서풍이 많이 출현하나 북동풍의 유입도 많은 편이다. 여름철에는 해륙풍의 변화가 뚜렷하고 주 품계는 남서풍이다. 가을철에는 북동풍이 자주 출현되는 점이 다른 계절과 상이하다. 품계별 특성에서 북서류는 겨울철 서고동저형 기압배치하에서 주로 나타나며 기압경도력이 강할 때에는 전 해상이 폭풍권에 들게 되나 다소 완만하면 먼바다 해역만 폭풍권에 놓이게 된다. 부산항 주변해역에서 가장 경계하여야 할 품계는 북동풍이며 북동류는 북고남저형 또는 동해고기압형에서 출현하게 되며 부산항 주변에 다다르 때에는 긴 취주거리를 갖기 때문에 빠른 시간내 고파현상이 나타난다. 북동류는 4~10월에 걸쳐 폭넓게 나타난다. 남서류는 장마전선형 저기압 통과형에서 주로 발생되며 하절기 가장 탁월한 바람이며 3~8월에 걸쳐 많이 나타난다. 부산항 주변해역중 영도구의 경우 북동풍과 남서풍이 많이 나타나며 오전시간대에는 육풍이 약한 북서풍이 일반적이다. 오후 시간대 해풍은 오후 2시경에 가장 강하며 평균 풍속은 3~6m/s 정도이다. 파고는 북동풍이

불 때 가장 높아지며, 6시간 정도 지속되면 2.5m이상 된다. 부산항을 중심으로 조차는 월조간격은 날에 따라서 다르나 이들의 변화가 날에 따라서 불규칙하게 변하는 것은 월령과 관계되고 있다. 부산항을 중심으로 수영만 송정만에 이르는 북동편 연안의 대조차는 작으며, 북동편 연안역의 조수위는 남서편 연안역의 조수위보다 높다. 부산근해역의 대조차는 약 1.2m 이다.

### 3.3 실해역 파랑계측

Table 3.1에 파랑계측정보를 나타내었다. 실해역의 파랑계측은 2015.03.26.부터 2015.08.01.까지의 기간에 시험해역에서 계측을 수행하였다. 관측 위치는 해양대학교 남단 200m지점에 설치하였으며, 유의파고, 최대파고, 최저파고, 파주기 등의 데이터를 송신하며 관측 위치의 수심은 7.2m이다.

파랑 계측 위치의 파랑 산포도를 Fig. 3.4에 나타내었다. 설치해역은 파주기 2s 부터 최대 주기 10s의 파 주기 영역에서 파고는 0.1m부터 최대 3.3m의 최대유의 파고 영역을 나타내었다. Fig. 3.5는 유의파고의 시계열 데이터를 나타낸 그래프이다. 데이터를 확인하여 보면 계측기간 중 총 3회의 태풍의 영향권 안에 들었다는 것을 확인할 수 있으며 이 때 최대 3.3m의 최대파고를 나타내었다. Fig. 3.6은 파고 분포를 나타낸 그래프이다. 유의 파고의 출현은 0.3m가 가장 많은 분포를 보였다. 해안가의 형상이 만이고 북쪽에 해안을 끼고 있기 때문에 북풍에 의한 영향은 거의 받지 않았으며, 남풍, 북서풍에 영향을 가장 많이 받은 것으로 보이며, 근해역에 비하여 파랑에너지 밀도는 낮게 나타났다.

Fig. 3.7은 파 주기를 시계열 그래프로 나타낸 것이다. 주기는 4.5s 대의 파랑이 가장 많은 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 3.8의 분포 그래프를 확인하여 보면 분포상의 8s이상의 파주기 대역의 경우 태풍으로 간주할 수 있다.

전체 계측기간에서의 설치해역의 평균 파고는 0.6m로 나타났으며, 평균 주기는 5s를 나타내었다.



Table 3.1 Wave measuring information

Measurement region	Measurement period	Latitude, Longitude	Measurement data	Water depth (m)
200m south of KMOU	2015.03.26.~ 2015.08.01	35° 07′ 53″ N 129° 09′ 30″ E	$H_s$ , $T_P$	7.2

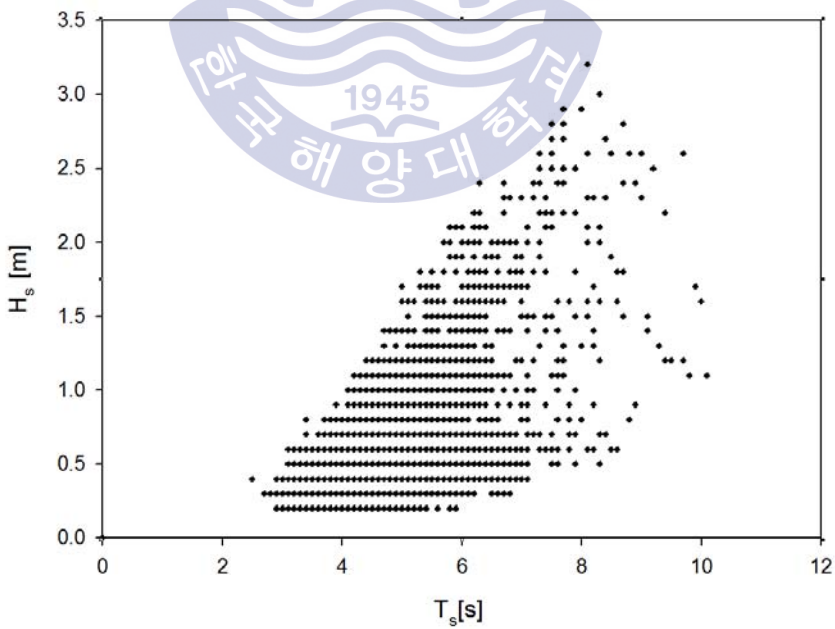


Fig. 3.4 Scatter plot of  $H_s$  and  $T_P$



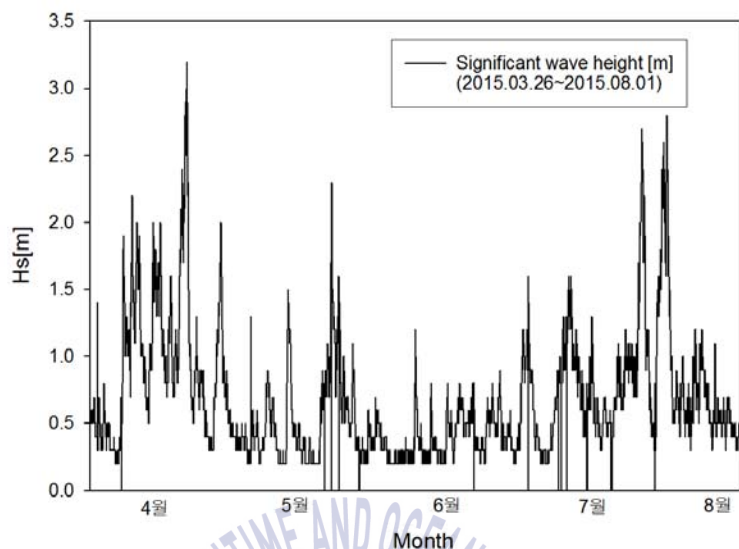


Fig. 3.5 Time series graph of  $H_s$  (2015.03.26~2015.08.01.)

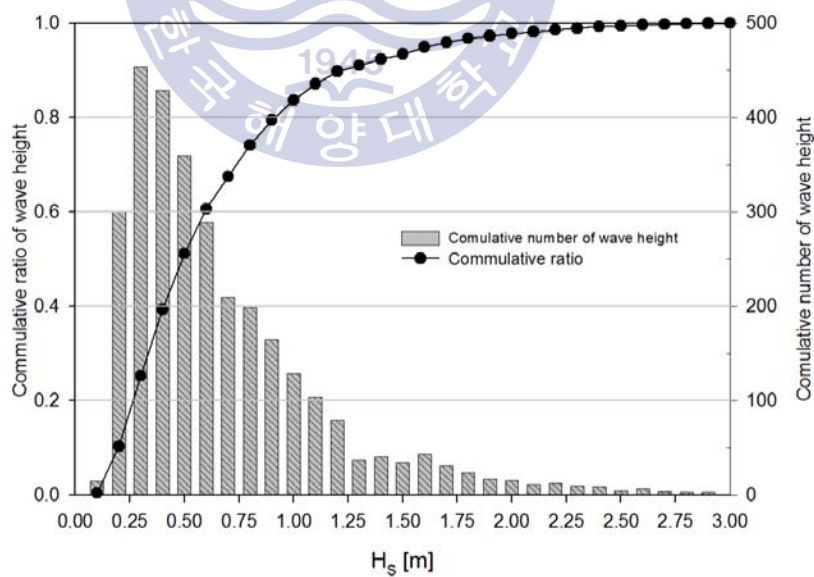


Fig. 3.6 Distribution of  $H_s$  (2015.03.26~2015.08.01.)

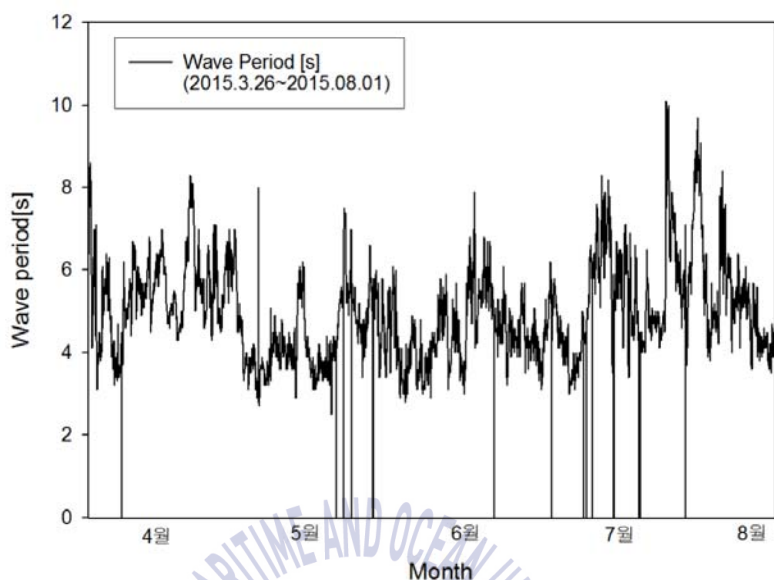


Fig. 3.7 Time series graph of  $T_p$  (2015.03.26~2015.08.01.)

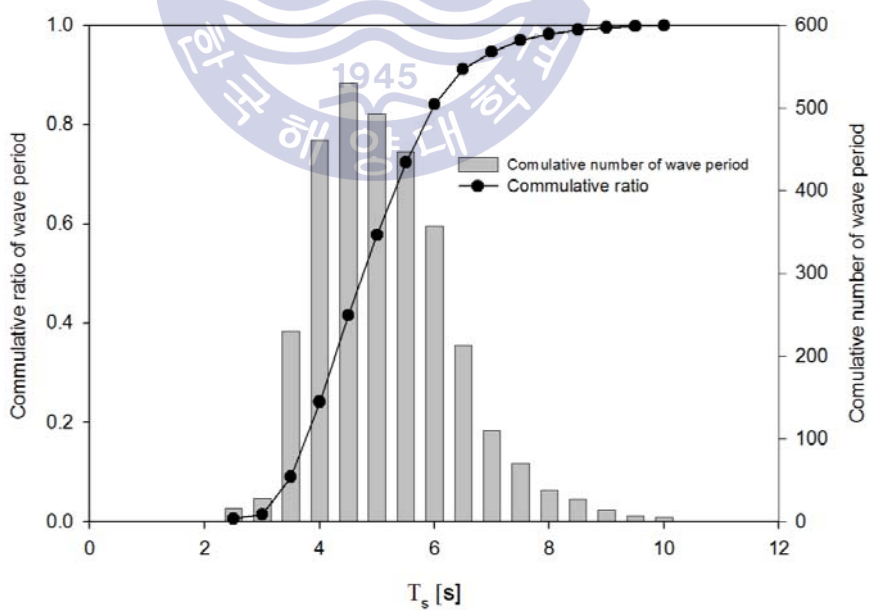


Fig. 3.8 Distribution of  $T_p$  (2015.03.26~2015.08.01.)

### 3.4 실효역 시험 장소의 파랑일률 산정

RPS(2010)에 의하면 파랑의 단위 폭 당 파력(일률)은 다음과 같다. 파력(일률)은 3시간 간격의 유의파고( $H_s$ )와 첨두주기( $T_p$ )를 이용하여 계산하고, 월별 및 연별로 파력(일률)을 평균하여 제시한다. 주기를 첨두주기로 추산하고, 설 치해역의 수심이 깊은 수심영역이 아니기 때문에 천해영역의 파랑에너지를 계산할 수 있는 식(3.1)을 이용하여 파랑에너지량을 산정하였다.

$$P_{wave} = 1/16 \rho g H_s^2 \frac{L}{T} b \left( 1 + \frac{4\pi/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right) \quad (3.1)$$

여기서,

$P_w$  : 파력일률(kW/m)

$H_s$  : 유의파고 (m)

$b$  : 장치폭 (m)

$T_p$  : 첨두주기 (sec)

$h$  = 수심 (m)

을 나타낸다.

Fig. 3.9에 식(3.1)를 이용하여 계산된 실효역의 파랑에너지 분포도를 나타내었다. 계측기간의 시간당 파랑에너지 중 1kW미만의 파랑에너지가 30%를 차지하였다. 2~3kW영역은 약 13%를 나타내었으며, 10kW이상의 영역은 태풍 기간의 파랑에너지 일률이며, 최대 m당 20kW의 일률을 나타내었다.

계측기간의 파랑데이터를 이용하여 기간별 평균 파력(일률)의 시계열 변화를 Fig. 3.10에 제시하였으며 계측기간의 파력(일률) 범위는 0.5~12kW/m로서,

2015. 5월 중에 최소이고, 2015년 4월 초와 7월중에 최대이다. 월별 파력(일률)은 하계(6~8월)에 4kW/m이지만, 평소에는 2kW정도의 일률을 가지고 있으며, 태풍의 영향으로 인한 국부적인 기간에서의 에너지량이 높게 나타났다. 인근 해역의 파랑 데이터(기상청)과 비교하였을 때 파랑이 40%가량 낮게 나타났다으며, 이는 천수, 쇄파 등에 의해 내습한 파고가 감소하고, 고파가 내습하는 동계에 해안으로 내습하는 파의 감소폭이 크기 때문인 것으로 보인다.

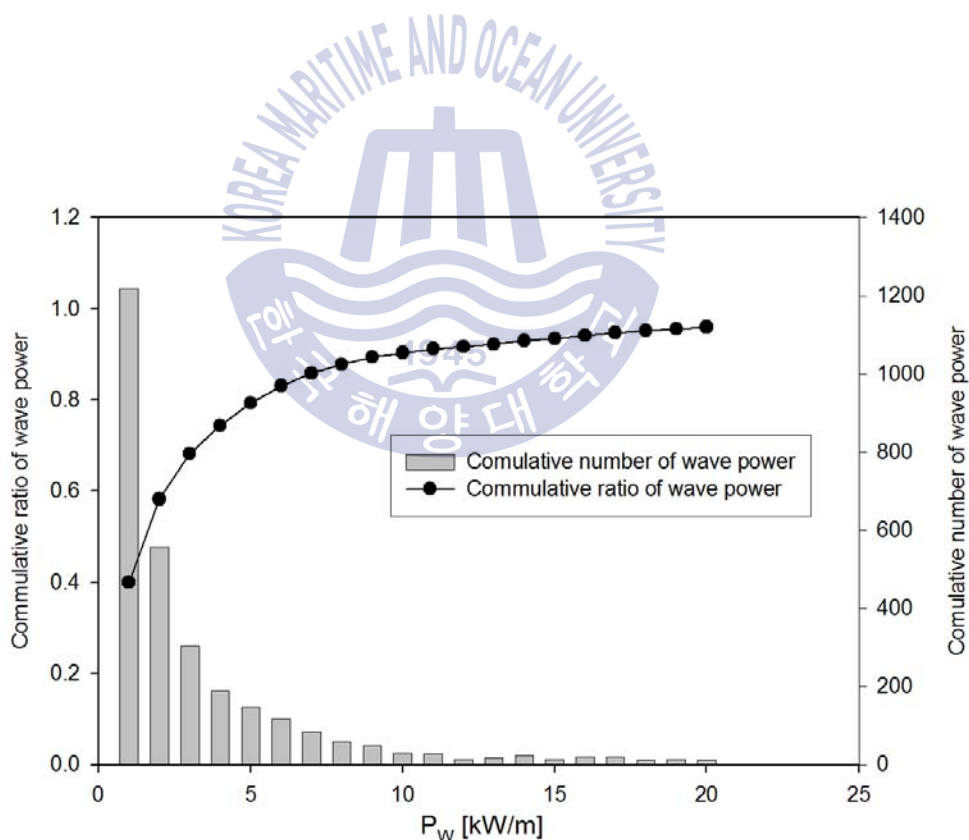


Fig. 3.9 Distribution of  $P_w$  (2015.03.26~2015.08.01.)

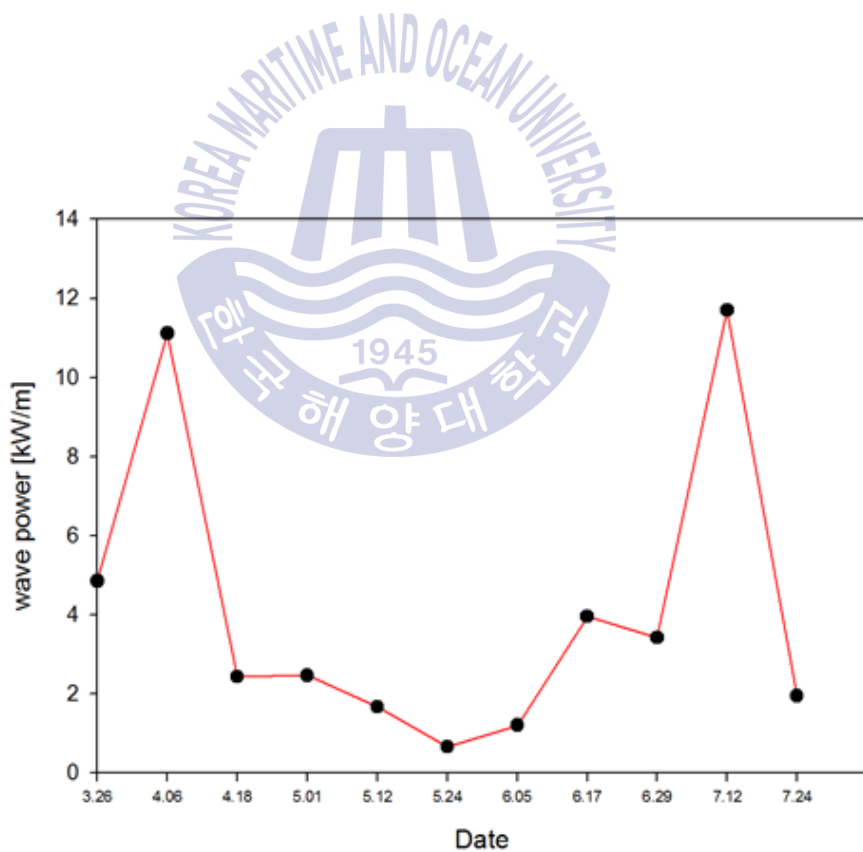


Fig. 3.10 Monthly Average wave energy (2015.03.26.~2015.08.01.)

## 제 4 장 PTO 시스템 연구

### 4.1 PTO모델 성능해석 및 실험

PTO장치는 해양의 상태에 따라 출력량에 대한 변화량이 크다. 이에 따라 발전기는 과부하 용량을 수용할 수 있는 발전기를 선정하여야 하며 파도와 장치간의 방사 및 회절로 인한 동작으로 인하여 에너지 변환이 매우 복잡화된다. 또한 전력이 변환되는 PTO종류에 따라서도 매우 다양한 모델이 존재한다. 이러한 파도에너지 변환 문제 중 가장 어려운 해결과제 중 하나가 PTO시스템이며 다양한 파라미터를 적용하여 본 장치에 적용한 수류터빈(PTO)의 성능 분석 및 다양한 해상조건에 따른 검토가 필요하다.

이를 위하여 부유식 파력발전장치의 유동해석 및 터빈성능시험을 시행하였으며, Fig. 4.2은 내부U-Tank 선체의 에너지 전달 유동해석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 기본적으로 수립된 PTO 컨셉모델의 기본성능, 터빈직경을 산정하였다. PTO시험장치에 이용된 터빈은 양방향 횡류터빈으로 양방향 흐름의 수류를 터빈이 단일방향으로 회전할 수 있도록 변환하여 주는 노즐의 형상을 가지고 있으며, 이에 대한 연구는 Prasad, et al.(2010)에 의하여 노즐형태에 따른 최적 성능을 나타내는지에 대한 연구가 진행되었으며, 양방향 횡류터빈의 기본 설계는 Fukutomi, et al.(1985)가 제안하였다. 또한 Choi, et al.(2009) 및 Prasad, et al.(2010)이 직접구동 파력발전 모델에 적용한 양방향 횡류터빈 및 노즐 형상을 연구하였다.

터빈 및 노즐의 기하학적 형상을 Fig. 4.1에 나타내었으며, 터빈의 외경은 240mm이며, 내경은 154mm이다. Table 4.1에 노즐의 제트 흐름에 따른 블레이드의 입사각과 출수각을 나타내었다. 블레이드 수는 30개의 블레이드로 구성하였으며, 제트흐름의 입사각은  $30^{\circ}$ , 출수각은  $90^{\circ}$ 로 터빈을 설계하였다.

**Table 4.1** Blade parameters

Type of Turbine	Cross-flow
No. of blades	30
Blade inlet angel, outlet angle	30 ° , 90 °
Ratio of inner &outer diameter	0.65

이렇게 설계된 노즐 및 터빈형상은 Fig. 4.2와 같이 유동해석 후 해석모델 및 터빈성능을 검증하기 위하여 부산대학교에 위치한 6DoF(Degree of Freedom) 모션 시뮬레이터를 이용하여 PTO시험장치의 검증시험을 수행하였다. 이에 대한 터빈성능시험장치의 센서 구성 및 치수를 Fig. 4.3에 나타내었으며, 시험장치의 사진을 Fig. 4.4에 나타내었다. PTO 시험검증을 위하여 제작된 모델은 터빈의 최적 회전수, 내부유동 CFD모델의 검증을 수행하였다. 터빈성능시험에 따른 실험조건은 다음과 같다.

첫째로 추에 부하를 걸지 않은 No load condition에서의 운전을 통하여 서로 다른 주기 조건에서의 피치각도(Pitching angle)에 따른 터빈의 RPM을 측정하여 최적의 주기조건을 선정하는 시험을 진행하였다. 이에 대한 시험 조건은 Table 4.2에 나타내었다.

**Table 4.2** Turbine performance test condition at no load condition

Pitching angle	2°
	4°
	6°
	8°
	10°
Pitching frequency	0.25Hz
	0.28Hz
	0.33Hz
	0.40Hz
	0.5Hz

둘째로 No load condition 시험조건에 따라 회전수를 계측하여 선정된 최적 진동수에서의 피치각도에 따른 터빈의 관성모멘트를 Fly wheel을 이용하여 증가시켜 관성 모멘트가 터빈성능에 미치는 영향을 확인하였으며 시험은 터빈에 브레이크를 이용하여 축에 부하를 인가하여 로드 시험을 진행하였다. 이에 대한 조건을 Table 4.3에 나타내었다.

**Table 4.3** Turbine performance test condition at load condition

Fly wheel weight	0kg
	3kg
	8kg
	13kg
	18kg
	23kg
Pitching frequency	0.25Hz
	0.33Hz
Turbine Rotation Speed	40-50 RPM
Water level	550mm



셋째로 최적 효율점을 찾기 위하여 시험을 통하여 선정된 최적 고유진동수 및 최적 관성 모멘트 조건상에서의 RPM에 따른 성능곡선을 도출하였다.

Fig. 4.5은 서로 다른 피칭 주기에 따른 U-tank 내부의 유량과 터빈의 회전수를 나타내었다. 유량은 주기가 길어짐에 따라 흐름의 변동폭이 줄어들게 되고 단일 방향흐름에 대한 시간이 길어지게 되어 주기가 길어질수록 내부 유량이 증가하게 되는 특성을 가진다. 하지만 주기가 길어짐으로서 모선에 의하여 생성된 U-tube 양단의 수두차가 줄어들게 되어 피칭 주기 4s에서는 터빈의 회전수가 줄어 드는 특성을 가지게 된다. 피칭각이  $4^\circ$  일 때, 피칭 주기가 2.5s에서 가장 높은 회전수를 나타내었고, 피칭각이  $6^\circ$  일 때, 3s에서 최대 회전수를 나타내었다. 피칭각이  $8^\circ$  일 때는 피칭주기가 3.5s일 때가 가장 높은 회전수를 나타내는 것을 확인할 수 있으며 피칭각이 증가함에 따라서 최대 회전수를 가지는 주기가 짧아지는 것을 알 수 있다. 하지만 과력발전장치를 설계함에 있어서 파랑의 주기와 매칭시켜야하기 때문에 2.5s, 3s, 3.5s중에 설계점을 선정하여야 한다. 주기 3s일 때에는 피칭각의 변동에 따라서도 회전수가 크게 변동하지 않고 5RPM이하의 회전수 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다.

서로 다른 피칭각에 대한 무부하 시험 결과를 Fig. 4.6에 나타내었다. 그래프를 확인하면, 각도가 증가함에 따라 위치에너지의 증가로 인하여 유량과 회전수가 상승하는 것을 볼 수 있고, 피칭각이  $2^\circ$  씩 증가함에 따라서 약  $0.01\text{m}^3/\text{s}$  유량증가를 나타내었으며, 같은 피칭각 상에서 주기가 1s씩 증가함에 따라서 유량이 약  $0.025\text{m}^3/\text{s}$  씩 증가된다. 이에 따라서 RPM은 주기가 변화 1s씩 변화함에 따라서 약 8RPM씩 증가되었다. 주기 2s, 피칭각  $2^\circ$  조건에서 터빈의 작동이 정지한 것을 확인할 수 있다. 이에 따라서 최소 주기점인 2s와 3s를 선정하여 Load시험을 진행하였다.

Fig. 4.7은 서로 다른 플라이휠 무게, 터빈회전수, 주기에 따른 터빈효율을 나타내었다. 주기가 2s일 때와 주기가 3s일 때의 그래프를 비교하여 보면 서로 상반되는 특성을 가진 것을 확인할 수 있는데 주기가 2s일 때, 관성이 증가함에 따라 하락하고, 주기가 3s일 때, 관성이 증가함에 따라 점점 상승하는

것을 확인할 수 있다. 이는 2s일 때는 양방향흐름의 생성 주기가 짧아짐으로 인하여 RPM의 변동폭이 크게 되고 이에 따라서 무게가 증가함에 따라서 초기 구동이 어려워지게 된다. 하지만 3s일 때는 양방향흐름의 생성 주기가 길어지게 되고 흐름이 생성될 충분한 시간을 가지게 되고 관성의 증가에 따라 터빈의 회전수변동이 작아지게 되어 터빈의 효율이 증가하게 된다.

시험을 통하여 최적 Fly wheel의 무게는 8kg를 선정하였으며 선정된 플라이휠을 적용하여 주기가 2s, 3s 일 때, RPM에 따른 성능시험을 수행하여 Fig. 4.8에 RPM과 주기에 따른 터빈성능 곡선을 나타내었다. 터빈 성능은 최대 48%로 계측 되었으며, 낮은 주기에 비하여 높은 주기 상에서의 회전수에 따른 최소 효율이 30%이상으로 높게 나타났으며, 이는 주기가 일정이상 확보가 되어야만 U-tank내부의 수두차에 의한 유량이 이동할 시간을 확보할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 플라이휠을 적용하여 관성의 증가를 통해 양방향 흐름에 따른 터빈 회전속도 변동폭을 줄일 수 있었지만 시험모델상에 16kg이상의 플라이휠을 설치하였을 경우 초기구동이 어렵고, 성능이 저하되는 것을 확인하였다.

주기가 2s일 때는 최적 효율점을 가지는 RPM은 피칭각이 증가함에 따라 12RPM씩 증가하였고 효율은 15%씩 증가하다가 피칭각이  $10^\circ$  일 때는 U-tank내부에 슬로싱 현상이 증가하게 되고 이에 따라 효율을 증가폭이 감소하였다. 피칭주기가 3s일 때는 주기 2s와는 다르게 피칭각이 변화하여도 최대 효율점이 10%이상 차이나지 않는다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 양방향 흐름이 생성될 충분한 시간을 가지게 되어 유량변동폭이 작아지게 되고 이에 따라서 일정한 터빈효율을 나타내는 것이다.

Fig.4.9는 다양한 회전 속도에 대한 피칭각  $6^\circ$ , 피칭 주기 3s에서의 5가지 경우에 대하여 실험 결과와 내부유동 CFD 계산 간의 비교를 나타낸다. CFD 계산을 위한 최고 효율 점은 50RPM에서 발생하는 반면 실험결과는 40RPM에서 발생하였다. 계산 된 유압 및 축동력은 실험 결과와 잘 일치되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 CFD유동해석을 통하여 내부유동 특성을 예측할 수 있다. 하지만 CFD계산상의 회전자의 RPM은 일정하지만 실험에서는 회전

자의 RPM이 지속적으로 변동하고 있어 출력은 물론 효율 또한 시험값과는 약간의 차이를 발생하게 된다.

Fig. 4.10는 피칭 주기가 3s, 피칭각  $6^\circ$ , 회전수가 40RPM일 때의 Particle Image Velocimetry(PIV) 결과와 CFD 속도벡터장을 나타낸다. Fig. 4.10(a)는 오른쪽에서 왼쪽 탱크로 흐르는 물의 PIV속도 벡터를 나타낸다. 물의 속도는 블레이드에 충격을 가할 때 가장 높으며, 하류로 갈수록 더 빠르다.

터빈의 출구에서 순환류가 관찰되며 이 순환흐름은 터빈에서 나가는 물을 벽쪽으로 밀어내며 그 지역의 수위를 더 높이게 된다. 이러한 흐름패턴은 Fig. 4.10(a)와 Fig. 4.10(b)의 결과와 유사하다. Fig. 4.10(c)와 Fig. 4.10(d)의 유동장에서 유사한 소용돌이가 같은 지점에 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

이 시험을 통하여 PTO시스템의 피칭운동은 물을 케이슨에서 주기적으로 상승 및 하강시켜 양방향 흐름을 생성하였고, 이를 통하여 터빈의 단일 회전에 구동하였다. 터빈의 가장 높은 성능은 피칭주기가 3s에서 40~50RPM의 설계 회전속도일 때 달성되며,  $0.053\text{kgm}^2$ 의 관성 모멘트가 모든 작동 조건에서 적합한 것을 확인하였다.

대부분의 테스트 케이스에서 40~50RPM 범위에서 최고 터빈효율 35%~45%를 얻을 수 있었으며 CFD 시뮬레이션은 시험 결과와 잘 일치하고 CFD와 PIV에서 관찰된 것과 같이 유동 패턴 또한 유사하였다. 이러한 내부유동장모델의 CFD 방법론을 활용하여 대규모 장치의 성능을 예측하였다. 이를 통하여 도출된 내부유동모델은 U-tank 형상을 최적화하고 실험역 모델의 설계에 적용하여 계산을 수행하였으며, 터빈성능 시험 결과를 이용하여 실험역 모델의 용량 계산 및 성능예측에 활용하였다. (Kim, et al., 2014)

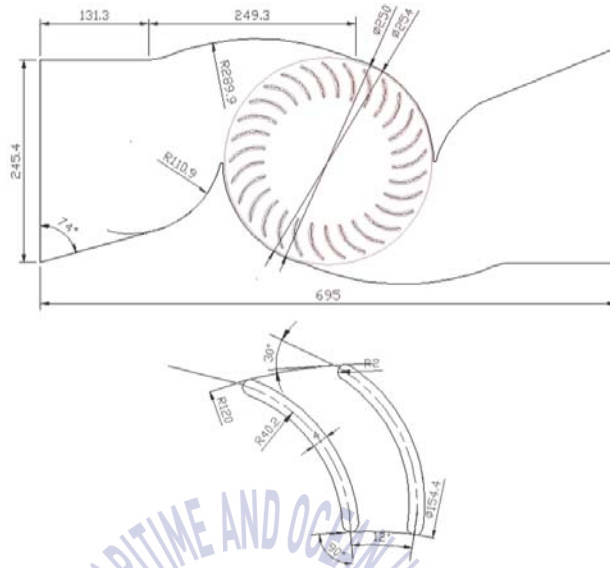


Fig. 4.1 Details of the cross-flow turbine used in the setup

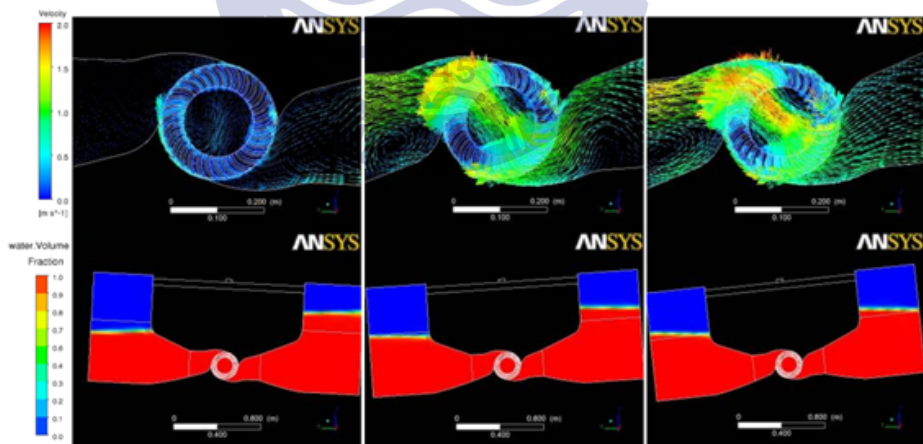


Fig. 4.2 Water velocity vector and water volume fraction at various time step at concept model

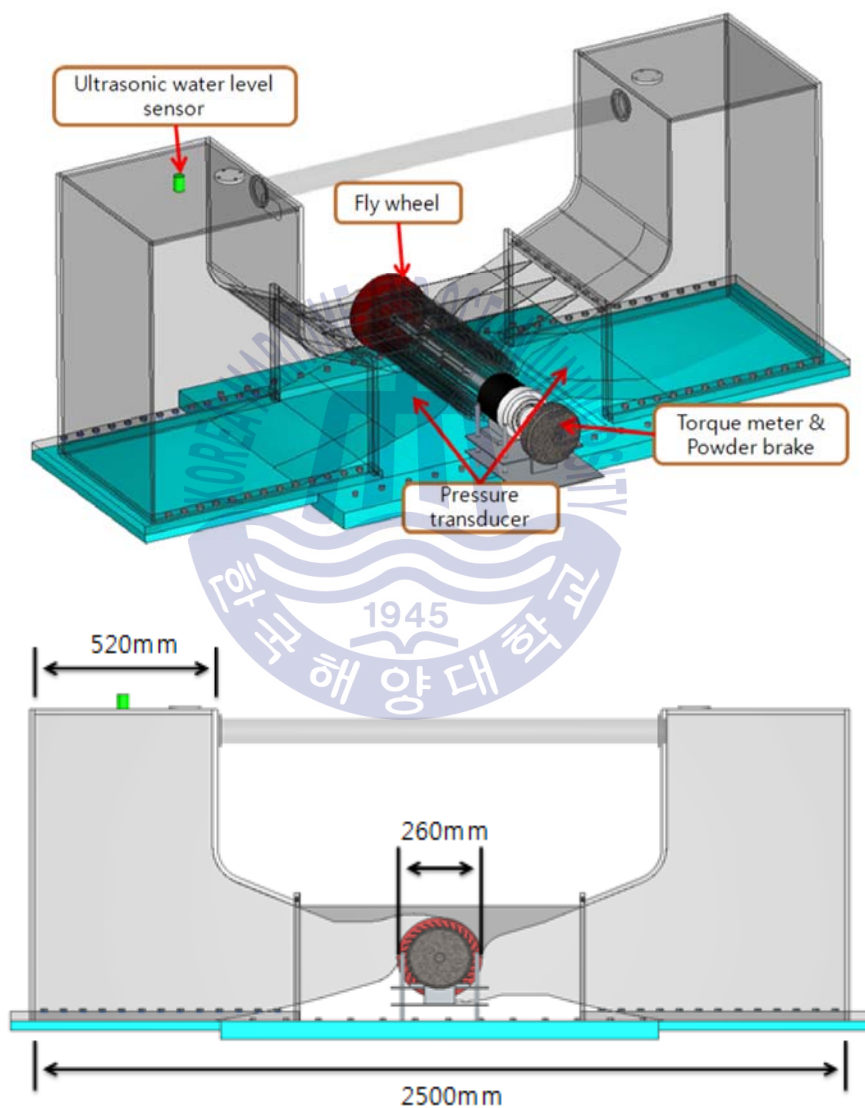


Fig. 4.3 Geometric details of the double-hull of the device

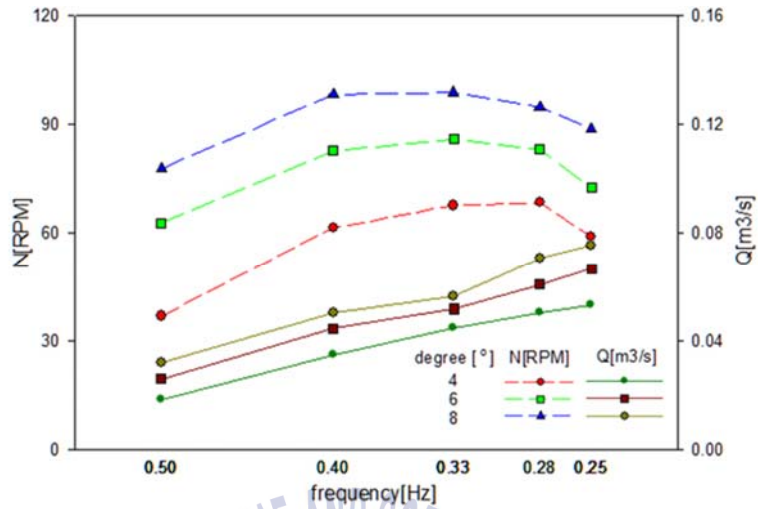


Fig. 4.5 The rotational speed,  $N$ , and flowrate,  $Q$ , at different pitching angles,  $\theta$

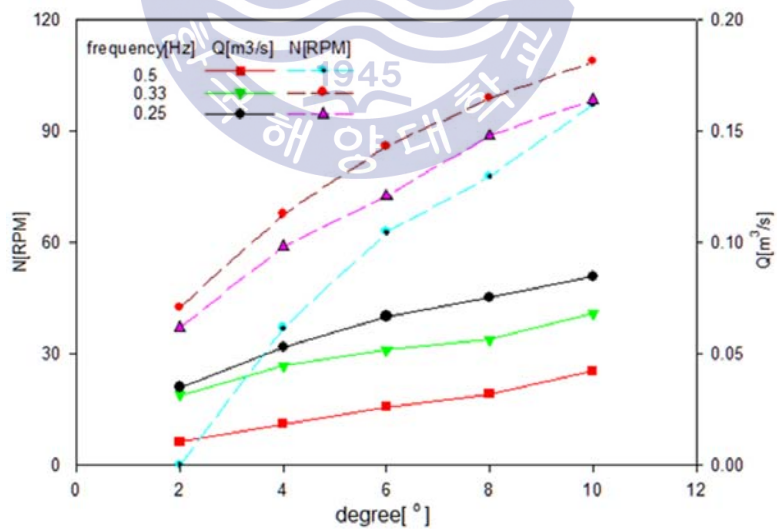


Fig. 4.6 The rotational speed,  $N$ , and flowrate,  $Q$ , at different wave periods,  $T$

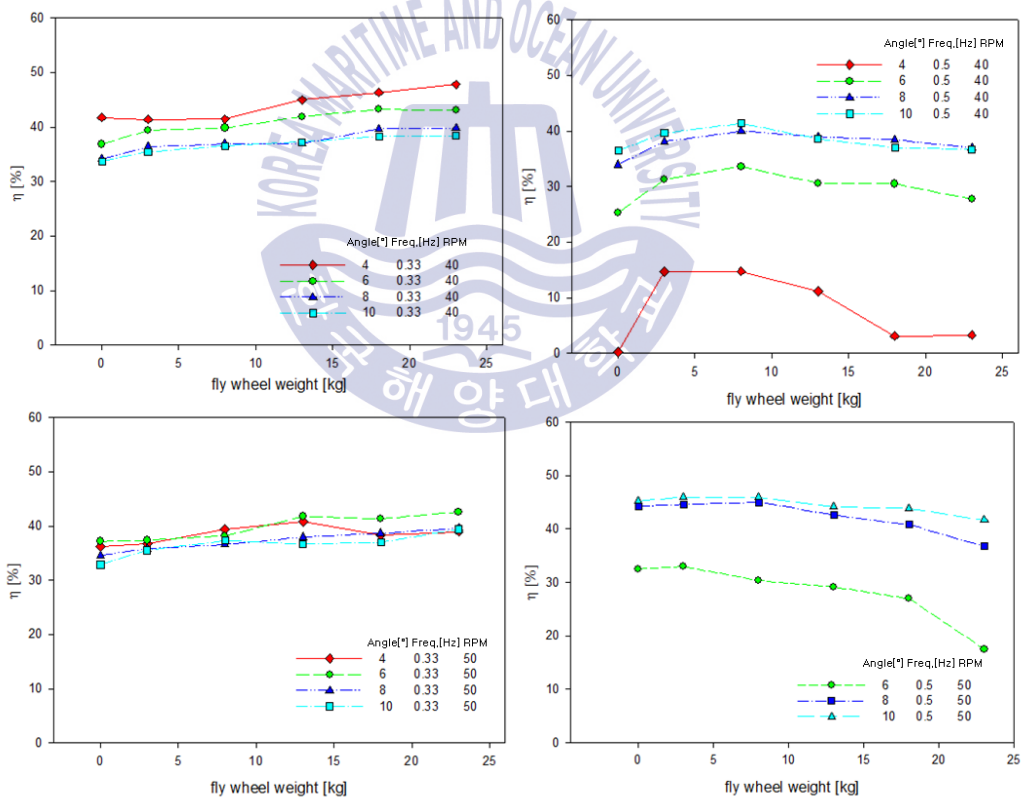


Fig. 4.7 Hydraulic efficiency,  $\eta$ , against flywheel weight for N = 40 and 50 RPM and for T = 3 s and T = 2 s



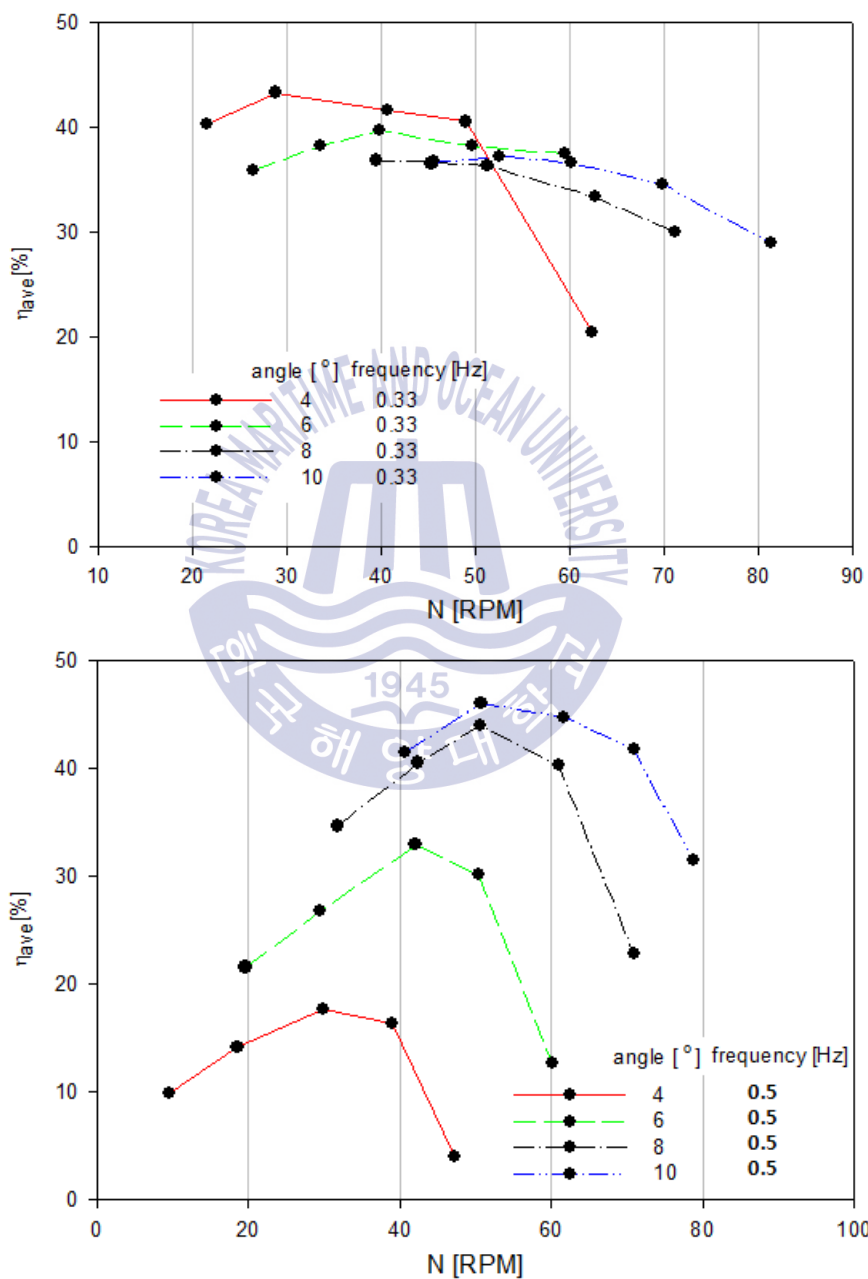
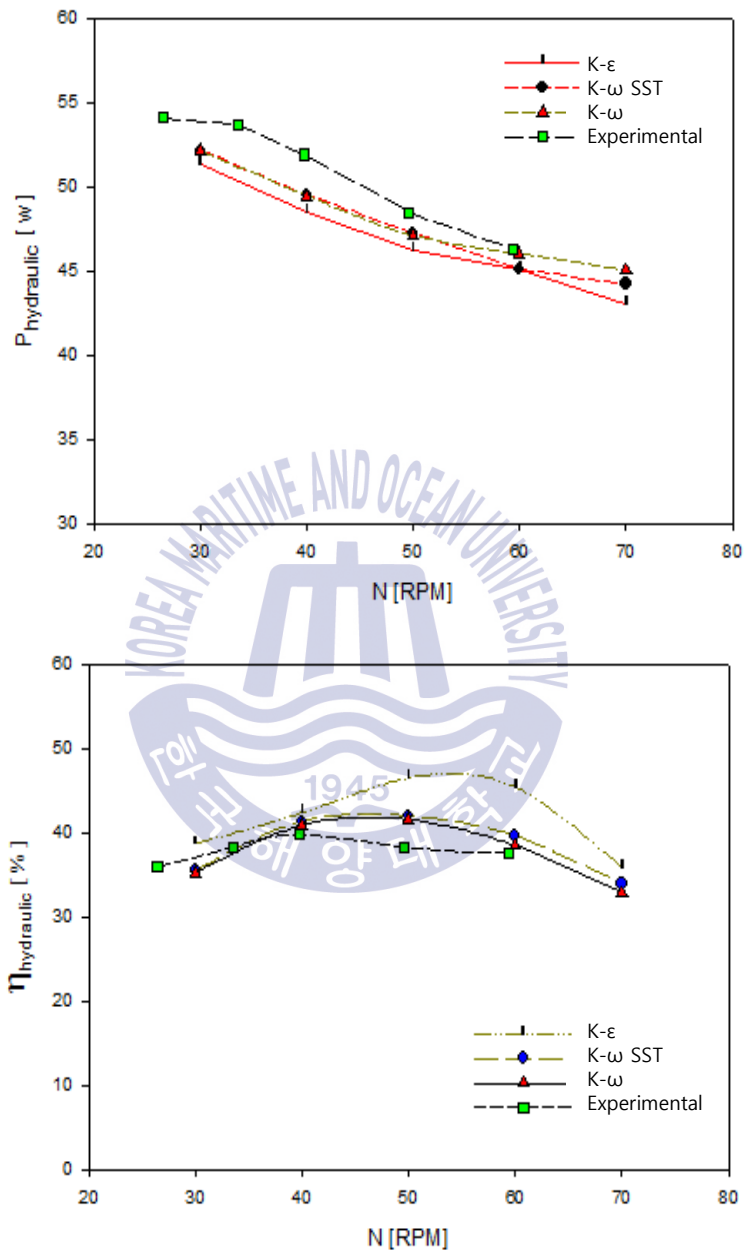
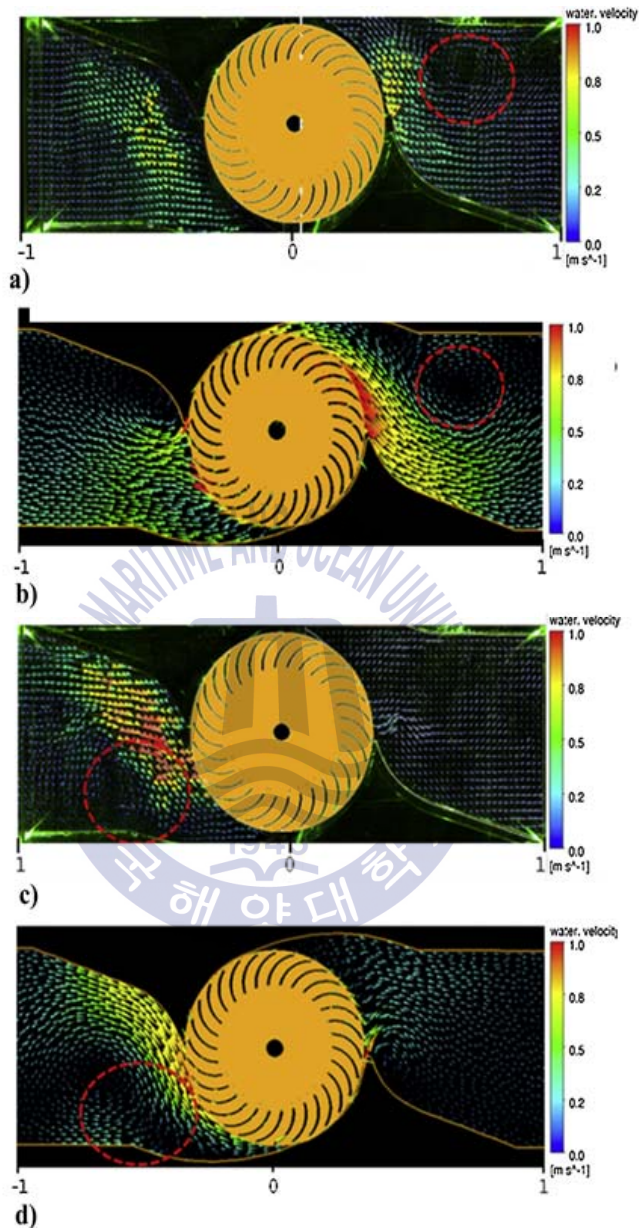


Fig. 4.8 Hydraulic efficiency,  $\eta$ , against  $N$  for  $T = 3$  s,  $T = 2$  s





**Fig. 4.9** CFD analysis results & comparison of hydraulic efficiency and hydraulic power at  $\theta = 6$  and  $N = 40$  RPM between numerical models and experimental results



**Fig. 4.10** PIV vectors and CFD vectors for  $T=3s$ ,  $\theta=6^\circ$ , and  $N=40\text{RPM}$ , a) Fluid flow moves from the left to the right(PIV), b) Fluid flow moves from the left to the right(CFD), c) Fluid flow moves from the right to the left(PIV), d) Fluid flow moves from the right to the left (CFD)

## 4.2 부유체 - 내부유동모델의 CFD을 통한 연계 해석

기본 부유체(외부선체) 모델의 부유체(강체) 해석을 통한 장치의 응답을 유동해석을 통하여 계산을 수행하였으며, Fig. 4.11은 파도 및 강체 모델의 입면도를 도시한다. 유동해석을 통한 강체모델은 Heaving 모션과 pitching 모션의 2개의 자유도를 가지도록 하였으며 파랑은 2차원 파랑을 생성하였다. 유동해석을 통하여 도출된 부유체의 모션프로파일을 3.1장에서 다루었던 내부유동모델에 적용하였다. 1kW 실험 시뮬레이션 모델의 설계에 앞서 유동해석을 통하여 용량에 대한 기본 성능 및 효율, 출력을 검토 하였다.

Fig. 4.12는 부유체의 모션프로파일을 적용하여 계산된 내부유동모델의 유량, 터빈양단에 걸리는 수두차, 터빈의 축동력의 시계열 데이터를 나타낸 그래프이다. 총 해석시간은 30s이며, 파도는 정현파를 구현하였으며, 파랑에너지는 10kW, 터빈의 출력은 1.9kW로 나타났다. 데이터가 안정화되는 7s~22s영역의 데이터를 활용하여 Table 4.4의 결과를 도출하였다.

1kW 해석모델의 파도에너지부터 U-Tank내부의 수력에너지(Wave energy - Hydraulic energy)로의 변환인 1차 에너지 변환효율은 34.5%로 나타났으며, 수력에너지부터 터빈의 축동력(Hydraulic energy - Shaft power)까지의 2차에너지 변환효율은 57%의 효율을 나타내어 최종적으로 파도에너지부터 축동력(Wave energy - Shaft power)까지의 1kW 모델의 효율은 19%의 파력발전장치 효율을 나타내었다. (Kim, et al.,2014)

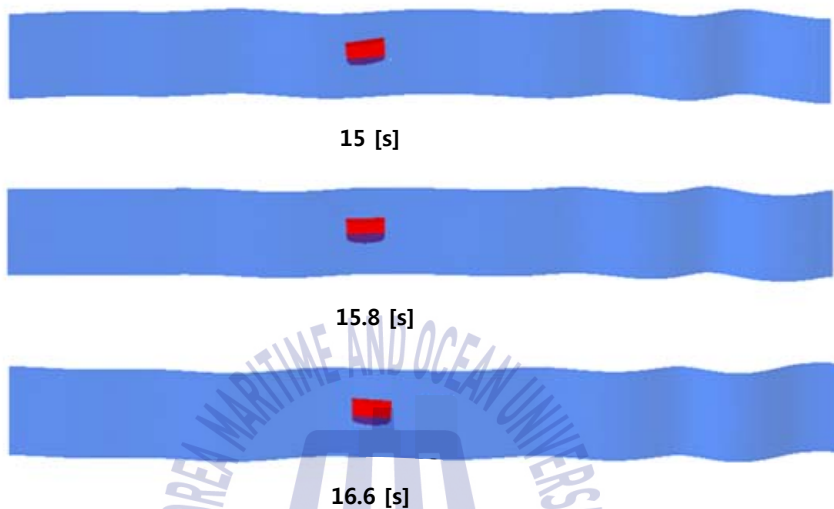


Fig. 4.11 Side elevation of the floating body model simulation

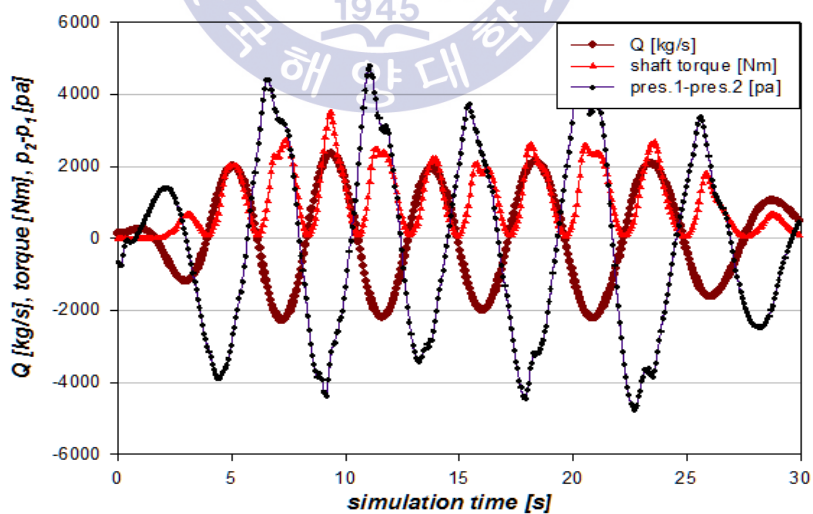


Fig. 4.12 1kW concept model results of (Hydrodynamic - PTO) coupled analysis

**Table 4.4** Wave reconditions using the linear wave theory and the calculated results

Shaft Power[kw]	Wave energy[kw]	Hydraulic eff.[%]	Primary eff.[%]	WEC eff.[%] (overall eff.)
1.9	10.1	57.1	34.5	19.7



## 제 5 장 파랑수조 모델 테스트

본 장에서는 부유체의 응답성능을 위하여 1:20 축소모델의 부유체 응답시험 및 20w급 축소모델 성능시험을 통하여 장치의 부유체 응답성능을 계측하였다. 20w급 축소모델의 경우 터빈 및 축동력을 계측하여 실험장치 설계를 위하여 사전 검증을 수행하였다. 또한 실험장치 시험모델의 설치 수심의 선정을 위한 파랑수조 시험을 수행하여 부유식 파력발전 실험장치의 크기에 적합한 설치수심을 선정하였다.

### 5.1 1:20 축소모델의 부유체 응답 시험

축소모델의 부유체 응답시험은 수심 0.8m의 조파수조 상에서 실험을 수행하였다. 작은 스케일로 시험장치를 제작하였기 때문에 터빈형상제작이 어렵다. 내부U-tank의 유동장에서 터빈을 대신하여 댐핑역할을 해줄 수 있는 오리피스 대신 설치하여 스케일 수조시험모델을 제작하였다. Concept모델을 바탕으로 설계 되었으며 Fig. 5.1와 같이 파랑수조에 시험장치를 설치하였다. 일반적으로 유동해석의 경우 비정상해석으로 인한 해석수행시간 매우 길어지게 되며 이로인하여 많은 설계파라미터의 수정이 필요한 Concept모델의 최적화는 쉽지 않다. 하지만 소형 장치로 제작된 부유체 시험은 상대적으로 단시간 내에 많은 값들을 유추할 수 있게 하며, 통찰력을 제공한다. 하지만 작은 시험장치의 사이즈로 인하여 센서의 설치가 쉽지 않다는 단점을 가지고 있다.

본 부유체 응답 실험에서는 상하동요-중동요(Heaving motion-Pitching motion)의 2자유도 시험(Fig. 5.2 (a))과 중동요(Pitching motion)만 자유도를 가지는 1자유도 시험(Fig. 5.2 (b))을 수행하였으며 이에 따른 내부유동의 이동과 자이로센서를 이용하여 선체의 Pitch각과 Heave를 계측하였다. 1자유도(Pitching)만을 가지는 모델이 Heaving의 영향이 없기 때문에 선체 내부의 U자형 챔버 내의 유동이 원활히 이동하는 것을 확인하였으며, 1DoF 실험 및 2DoF 실험의 부유체의 응답에 따른 내부유동변화를 확인하여 보면 Heaving을 최대한 억제해야 됨을 확인하였다.

또한 부유체의 무게중심을 뒤로 이동시켜 앞단과 뒷단의 운동응답 성능을 변화시켜 Heaving의 영향이 있다 하더라도 내부 유동의 채널에 경사를 주어 상하 동요로 인해 생성된 유체의 속도를 노즐로 인도하여 U-tank 내부의 유동량이 증가함을 확인하였다.

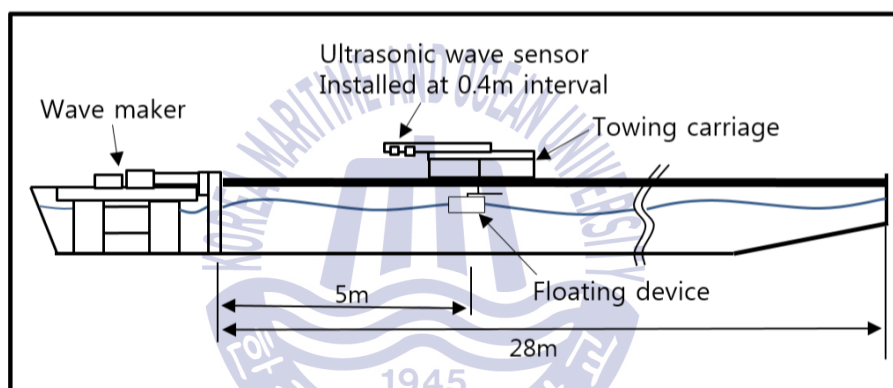
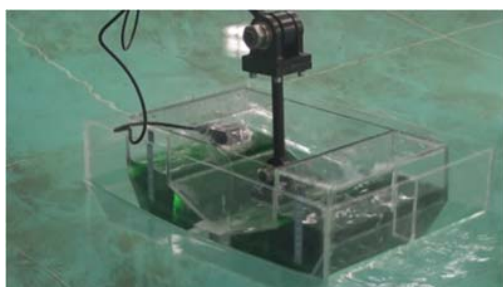
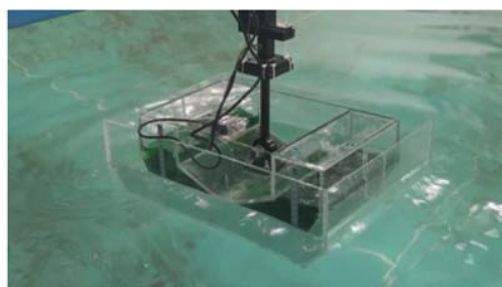


Fig. 5.1 Experiment setup of floating model



(a) 2DoF



(a) 1DoF

Fig. 5.2 Picture of the drawing and floating model



## 5.2 20W 파력발전시험모델의 파랑수조 모형 시험

### 5.2.1 시험 목적

Hydrodynamic Diffraction 해석, Response 성능 해석 및 PTO 해석, 실험등을 통하여 설계된 20W 모델 성능 시험 장치를 제작하여 시험을 수행하였다. 수심 2m, 파고 0.5m을 발생시킬 수 있는 해양환경관리공단의 조파수조를 사용하여 시험을 수행하였다. 시험의 정확성을 위하여 파랑수조의 보정을 수행하였으며, 파력발전장치의 길이(L)는 2.3m이며 해상에서 계측된 파랑데이터를 바탕으로 Froude number를 적용하여 소형 모델로 제작을 하여 장치의 효율, 최적주기, 응답성능 검토하였다. 소형 조파수조의 경우 반사파의 영향으로 계측할 수 있는 데이터수가 제한되지만 본 시험을 수행한 조파수조는 후방에 부채꼴로 퍼져 있는 호안이 있어 파랑을 안정적으로 흡수하여 계측의 정확성을 높였다.

### 5.2.2 시험 장치 설계

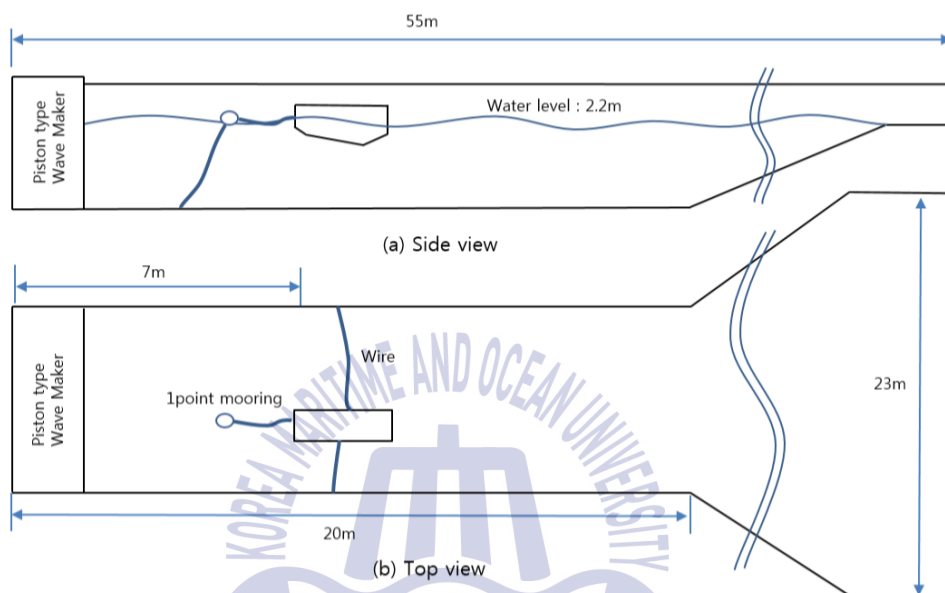
대형 파랑수조 성능시험 모델은 Fig.5.3에 나타내었다. 시험장치의 설계를 위하여 조파수조의 수심 및 발생가능 파고를 계측하여 사전 파랑 보정작업을 수행하였다. 한국해양대학교 남단에 설치를 목표로 하였기 때문에 실험역 장치의 수심을 8m로 설정하여 시험장치의 스케일을 설정하였다. Table 5.1에는 파력발전장치의 성능시험을 위한 계측장치들을 나타내었다. Table 5.2에는 20w 파력발전시험장치의 파라미터를 나타내었으며, 시험장치의 길이는 2.5m, 전단의 높이 0.9m, 후단의 높이는 1.3m로 하단에 10°의 경사를 주었다. 시험장치의 무게는 1.47ton이며, U-tank내부에 0.55m까지 청수를 채웠으며 청수의 무게는 0.66ton이다. 장치의 폭은 1.56m터빈의 직경은 0.255m로 설계를 수행하였다. Fig. 5.4에 시험장치 설치도를 나타내었다. 파력발전장치의 계류방식은 1점 point 계류를 하였으며, 장치의 Yawing을 방지하기 위하여 조파수조 폭방향 양단에 선을 이용하여 고정하였다. 추를 이용하여 설계치에 맞는 파력발전장치의 무게중심을 맞추었다.

**Table 5.1** Measuring Parameters

Measuring parameter	Measuring range	Measuring instrument
Water level inside chamber	0.3~1.2m	Ultrasonic wave height sensor
Wave height	0.3~1.2m	Ultrasonic wave height sensor
Hull motion	-	Gyro sensor
Turbine rotational speed	0~1000RPM	Magnetic type rotation detector
Torque	0~5kgf-m	Torque meter



**Fig. 5.3** Test device for 20W-class experimental setup in wave tank



**Fig. 5.4** Schematic view of the wave energy device and location of test device

**Table 5.2** Design parameter of 20W model test

Parameters	Reference ocean data	Scale translation	
		Test model	Sea model (1kW)
Scale factor [ $\alpha$ ]	1	0.25	1
Period [s]	5, 6	1.8 ~ 2.5	5, 6
Waver depth [m]	20	2.3	20
Object geometry [m]	10	2.5	10
Wave height [m]	0.5 ~ 2.5	0.05 ~ 0.35	0.2 ~ 1.5

### 5.2.3 파랑 수조

부유식 파력발전 실험 장치를 설치한 조파장치는 해양환경관리공단 (KOEM) 산하 해양환경개발교육원에 설치된 2차원 피스톤형 조파수조로 파랑수조의 재원을 Table 5.3에 나타내었다. 파랑수조의 길이는 총 20m이며, 폭은 8m, 수심은 2.3m이다. 파랑수조 후단에 인공해안을 가지고 있어 반사파의 영향이 작게 설계되어졌으며, 조파장치의 운전영역은 최대파고 0.5m이며, 파주기는 0.1s~3s영역에서 운전을 할 수 있다. Fig. 5.5은 파랑수조의 파랑조건 보정그래프를 나타내었다. 파고가 100mm~400mm까지는 선형적으로 발생하는 것을 확인할 수 있으며 원하는 파고에서 시험을 수행하기 위하여 식(5.1)을 작성하여 Table 5.4의 주기별 변수와 파랑수조 컨트롤러의 입력 파고를 적용하면 원하는 파고조건을 얻을 수 있다. 여기서 식(5.1)은 다음과 같다.

$$Measuring H = A(Input H) - B \quad (5.1)$$

Table 5.3 Wave tank specifications

Length[m]	20
Wide[m]	8
Water depth[m]	2.4
Maximum Wave height[m]	0.5
Periods[s]	0.1-3
Wave maker type	Piston

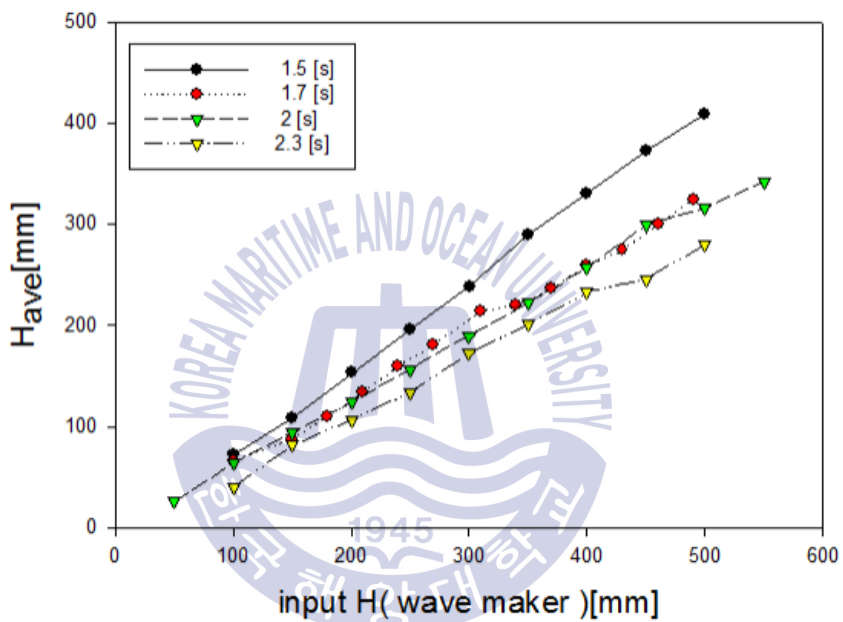


Fig. 5.5 Wave maker calibration

Table 5.4 Calibration variable

Periods [s]	A
1.5	0.66
1.7	0.64
2	0.59
2.3	0.86

## 5.2.4 실험 케이스

각각의 케이스는 차후 실험역 시험 모델을 설치할 장소인 한국해양대 남단 해안의 파랑 계측 데이터를 기준으로 설정하였다.

실험역에 대응하는 1:4scale을 Froude Number를 적용한 파랑조건을 적용하였으며 파랑수조시험의 파주기의 영역은 1.7s~3.4s, 실험역기준 으로는 3.4s~6.8s이다. 파랑수조시험상의 파고조건은 150mm~330mm 영역이며 이에 대응하는 실험역 조건은 0.6m~1.2m의 조건에서 시험을 수행하였다.

## 5.2.5 실험 결과 (정현파)

Fig. 5.6의 서로 다른 주기에 따른 파력발전장치 터빈의 No load시험 상에서의 회전수를 나타내었다. 그래프를 확인하였을 때 그래프 상으로  $T_p$ 가 2.2s일 때 가장 높은 터빈 회전수를 나타내었다. 이에 대한 세부 결과를 Table 5.5에 나타내었다. 정현파 상에서의 장치의 피칭 고유진동수는 그래프에 나타난 것처럼 0.5Hz이며, 실험역 기준으로  $T_p$ 가 4.6s일 때 가장 높은 성능을 나타낸다. 이 피칭 고유진동수에서 높은 성능을 나타내며 터빈의 회전수가 증가하는 것은 U-tank내부의 유량이 증가하였다는 것을 의미하며 이 영역을 벗어날 경우 내부의 물이 터빈을 지나가는 횡방향 흐름이 아니고 상하동요에 의한 슬로싱 현상이 발생하여 내부 유동장이 영향을 받는다. Table 5.6과 Fig. 5.7을 보면 고유진동수 상에서 파고가 증가할수록 터빈의 회전수도 선형적으로 증가되는 것을 확인할 수 있다. 해당 테스트 결과는 터빈의 성능이 파주기와 파고와 관련이 있다는 것을 의미한다. 파랑주기가 2s일 때 파장은 6.1m이며 이 파장은 모델길이의 약 2배이며 장치 선체의 양끝 단에 서로 다른 방향으로 반발력을 발생시킨다. 본 장치의 성능이 파고보다 파주기에 더 의존한다고 가정하였으므로 파도 상태를 특정하기 위해서는 매개 변수로 파주기를 사용할 수 있다. 장치의 load 조건상에서 장치의 최대 효율점을 찾기 위하여 주기 2s에서 파고를 변경하여 서로 다른 RPM에 따른 결과를 Table 5.7, 5.8, 5.9 와 그래프 Fig. 5.8에 나타내었다. 파력발전장치의 최대 효율은 22%로 나타났으

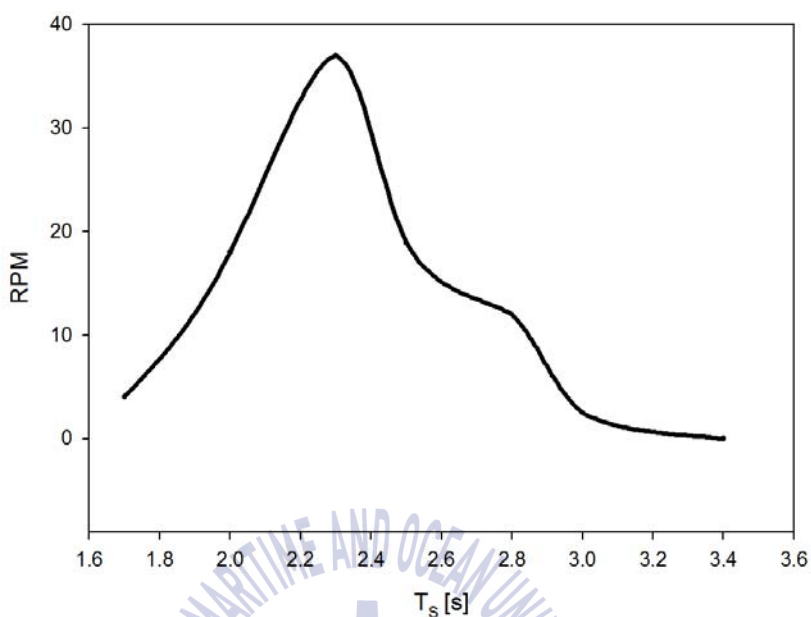
며 낮은 파고일수록 더 높은 효율을 나타내었다. 이는 피칭 고유진동수 상에서 시험을 수행하였기 때문에 높은 파랑이 가지는 에너지량이 파고에 따라 급격히 증가하기 때문으로 높은 파고를 가지고 입사되는 파랑대비 피칭각의 증가로 인한 출력증가량이 작기 때문이다. 본 시험을 통하여 본 파력발전장치가 파랑 에너지를 기계적 에너지로 변환할 수 있는 개념을 증명하였다. 이 시험을 통하여 Pitching을 이용하는 파력발전기의 특성을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

첫째로 장치의 성능은 파랑주기에 따라 큰 영향을 받는다. 파랑주기는 수심과 함께 파장에 영향을 미치며, 파장이 모델길이의 약 2배가 될 때 파력발전장치의 선체의 Pitching모션이 증가한다.

둘째로 최적의 파랑조건에서 본 파력발전장치의 최대효율은 24%로 높은 효율을 나타내었다. 적용된 계류방식과 5.1장에서 분석한 것과 같이 Heaving을 강제구속시켰을 시 효율이 크게 증가할 것으로 보이나 해상에 Heaving모션을 강제하기 위해서는 파일을 설치해야 하며 이에 연결된 장치의 내구성에 심각한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

셋째로 Table 5.10, 5.11을 비교하였을 시 실패역 파고가 0.8m이상이 되어야 10%이상의 효율을 발생하였으며 실패역 파랑 약0.5m에서는 출력이 거의 발생되지 않을 것으로 예상된다.

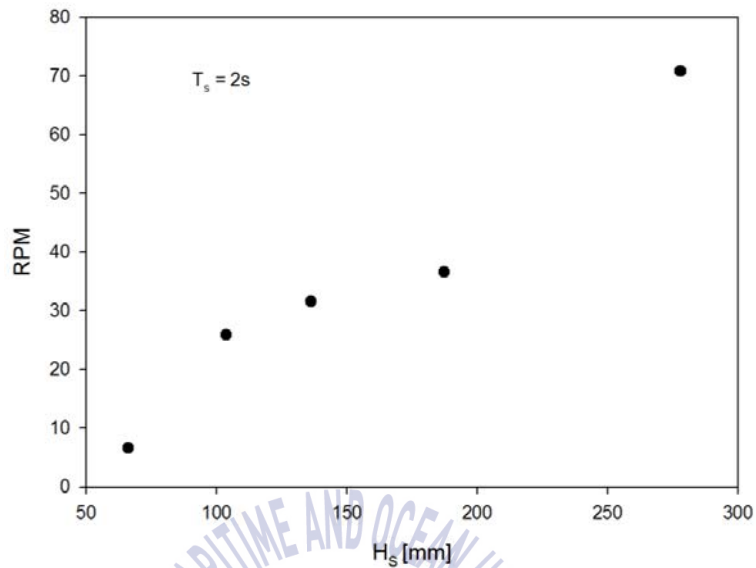




**Fig. 5.6** Evaluation of the dependency of the model towards wave period in regular waves under no load conditions

**Table 5.5** No-load test results according to  $T_P$

Test No.	Model	Real	Model	Real	Load	$\lambda$ [m]	RPM	Depth [m]
	$T_p$ [s]		$H_s$ [mm]					
1	1.7	3.4	303	1213	x	4.5	4.03	2.38
2	2	4	274	1096	x	6.1	18	2.38
3	2.3	4.6	165	660	x	7.8	37	2.38
4	2.5	5.0	185	740	x	9.0	18.9	2.38
5	2.8	5.6	184	738	x	10.8	12	2.38
6	3.0	6.0	195	780	x	11.9	2.5	2.38
7	3.4	6.8	153	613	x	14.1	0	2.38



**Fig. 5.7** Evaluation of the dependency of the model towards wave height in regular waves under no load conditions

**Table 5.6** No-load test results according to  $H_s$

Test No.	Model	Real	Model	Real	Load	$\lambda$ [m]	RPM	Depth [m]
	$T_P$ [s]		$H_S$ [mm]					
8	2	4	66.1	264	x	6.15	6.6	2.38
9	2	4	103.6	414	x	6.15	25.9	2.38
10	2	4	136.3	545	x	6.15	31.6	2.38
11	2	4	187.4	750	x	6.15	36.6	2.38
12	2	4	278	1112	x	6.15	70.9	2.38

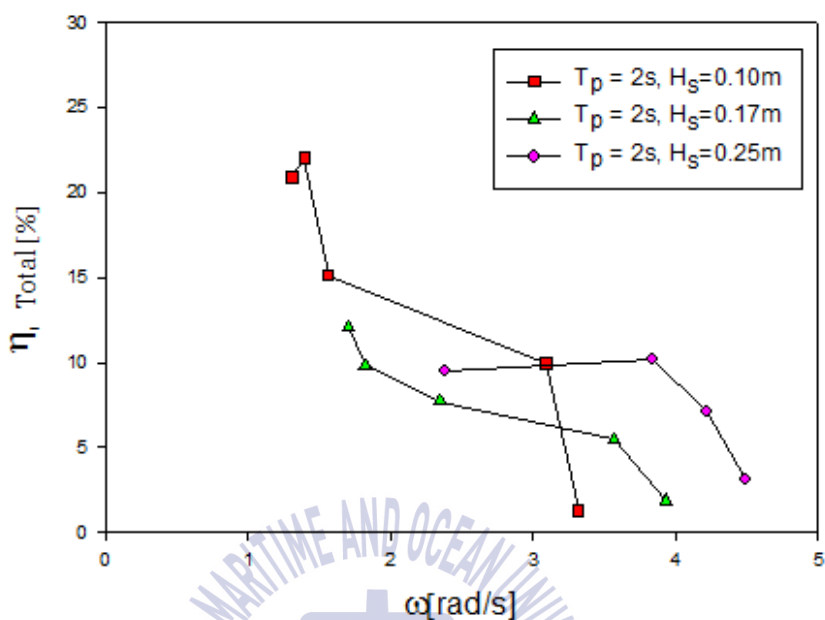


Fig. 5.8 Performance at optimum load for three sea states

Table 5.7 Load test results ( $T_p = 2s$ ,  $H_s = 103mm$ )

Test No.	Model	Real	Model	Real	$\lambda$ [m]	RPM	Depth [m]	$P_w$ [w]	$P_s$ [w]	$\eta_T$ [%]
	$T_P$ [s]		$H_S$ [mm]							
13	2	4	103	311	6.15	31.7	2.38	75	0.27	1.2
14	2	4	103	311	6.15	29.6	2.38	21.6	2.16	9.9
15	2	4	103	311	6.15	14.9	2.38	21.6	3.28	15.1
16	2	4	103	311	6.15	13.3	2.38	21.6	4.77	22.0
17	2	4	103	311	6.15	12.5	2.38	21.6	4.53	20.8

**Table 5.8** Load test results ( $T_P = 2s$ ,  $H_S = 178mm$ )

Test No.	Model	Real	Model	Real	$\lambda$ [m]	RPM	Depth [m]	$P_w$ [w]	$P_s$ [w]	$\eta_T$ [%]
	$T_P$ [s]		$H_s$ [mm]							
18	2	4	178	534	6.15	37.6	2.38	64.1	1.21	1.8
19	2	4	178	534	6.15	34.1	2.38	64.1	3.50	5.4
20	2	4	178	534	6.15	22.4	2.38	64.1	4.94	7.7
21	2	4	178	534	6.15	17.4	2.38	64.1	6.28	9.7
22	2	4	178	534	6.15	16.3	2.38	64.1	7.73	12.0

**Table 5.9** Load test results ( $T_P = 2s$ ,  $H_S = 256mm$ )

Test No.	Model	Real	Model	Real	$\lambda$ [m]	RPM	Depth [m]	$P_w$ [w]	$P_s$ [w]	$\eta_T$ [%]
	$T_P$ [s]		$H_s$ [mm]							
23	2	4	256	770	6.15	42.9	2.38	133	4.14	3.11
24	2	4	256	770	6.15	40.3	2.38	133	9.44	7.09
25	2	4	256	770	6.15	36.7	2.38	133	13.55	10.18
26	2	4	256	770	6.15	22.8	2.38	133	12.62	9.48

**Table 5.10** Load test results ( $T_P = 2.3s$ ,  $H_S = 165mm$ )

Test No.	Model	Real	Model	Real	$\lambda$ [m]	RPM	Depth [m]	$P_w$ [w]	$P_s$ [w]	$\eta_T$ [%]
	$T_P$ [s]		$H_s$ [mm]							
27	2.3	4.6	165	495	7.89	27	2.38	69	1.57	2.2
28	2.3	4.6	165	495	7.89	13	2.38	69	2.21	3.2
29	2.3	4.6	165	495	7.89	12	2.38	69	2.34	3.4

**Table 5.11** Load test results ( $T_P = 2.3s$ ,  $H_S = 288mm$ )

Test No.	Model	Real	Model	Real	$\lambda$ [m]	RPM	Depth [m]	$P_w$ [w]	$P_s$ [w]	$\eta_T$ [%]
	$T_P$ [s]		$H_S$ [mm]							
30	2.3	4.6	288	865	7.89	45	2.38	211	6.6	3.15
31	2.3	4.6	288	865	7.89	34	2.38	211	11.8	5.62
32	2.3	4.6	288	865	7.89	26	2.38	211	12.1	5.73
33	2.3	4.6	288	865	7.89	22	2.38	211	11.8	5.60

### 5.2.5 실험 결과 (불규칙파)

일반적으로 불규칙 파랑시험 및 파랑계측에 활용되는 JONSWAP 스펙트럼의 경우 파주기 분포가 ITTC에 비하여 좁은 영역에 밀집하여 있고 파랑에너지 밀도가 더 높게 위치하고 있다. 이로 인하여 JONSWAP 스펙트럼은 극한 파랑조건 및 생존성 등에 더 많이 활용되고 있다. 이 스펙트럼에 비하여 ITTC 스펙트럼은 일반적인 해역의 파주기 분포와 닮아 있다.

파력발전 시험장치를 JONSWAP 스펙트럼과 ITTC 스펙트럼을 활용하여 유의주기가 2.0s에서 시험을 수행하였다. Fig. 5.9은 JONSWAP 스펙트럼으로 생성된파랑의 주기분포도를 나타내었다. 최대 파고 110mm이며, 날렵한 형태의 주기분포도를 가지고 있다. Fig. 5.10은 ITTC 스펙트럼의 파랑의 주기분포도를 나타내었다. 유의주기 2s로 생성한 파랑은 최대 유의주기는 0.53Hz로 나타났으며, 0Hz부터 0.8Hz까지 넓은 영역에 파주기가 분포되어 나타난다. 이에 대한 JONSWAP 스펙트럼 상의 파력발전장치의 출력과 터빈 회전수의 시계열 데이터를 Fig. 5.11에 나타내었다.

출력이 불규칙 파랑에 의하여 불규칙 하지만 전체 스펙트럼 영역에 대하여 높은 가동률을 나타내는 것을 확인할 수 있으나, ITTC 스펙트럼상의 파력발전장치 시험결과 시계열 그래프인 Fig. 5.12를 확인하여 보면 작동주기에 맞는 영역에서만 작동과 정지를 반복하고 있다. 이런 장치의 피칭고유진동수 영역이 작기 때문에 주기의 변동에 따라 파장의 길이가 변하게 되고 파장이 약 2배가 되는 지점에서만 발전을 했다는 것을 의미한다.

일반적으로 JONSWAP스펙트럼의 파랑을 나타내는 파랑의 상태는 스웰 파도이며 본 장치의 경우 실험해역 사이트의 선정 시 파랑스펙트럼이 좁은 지역에 설치하는 것이 바람직하다.

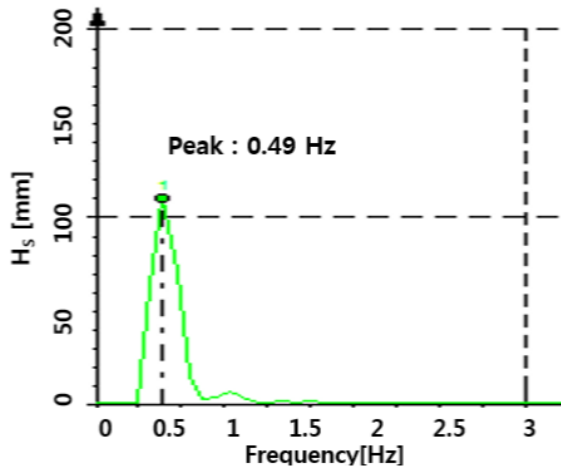


Fig. 5.9 Irregular wave (JONSWAP spectrum) FFT analysis

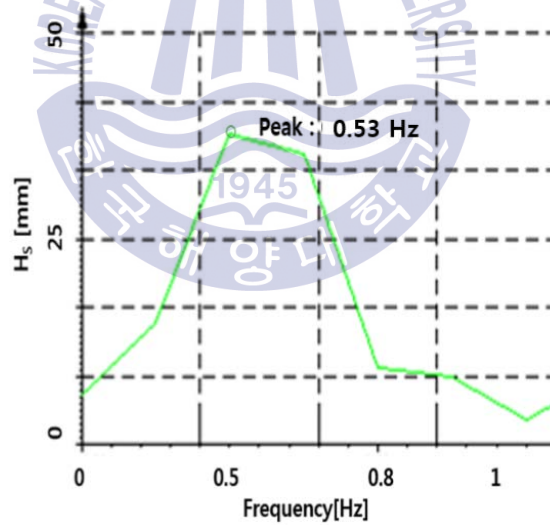


Fig. 5.10 Irregular wave (ITTC spectrum) FFT analysis



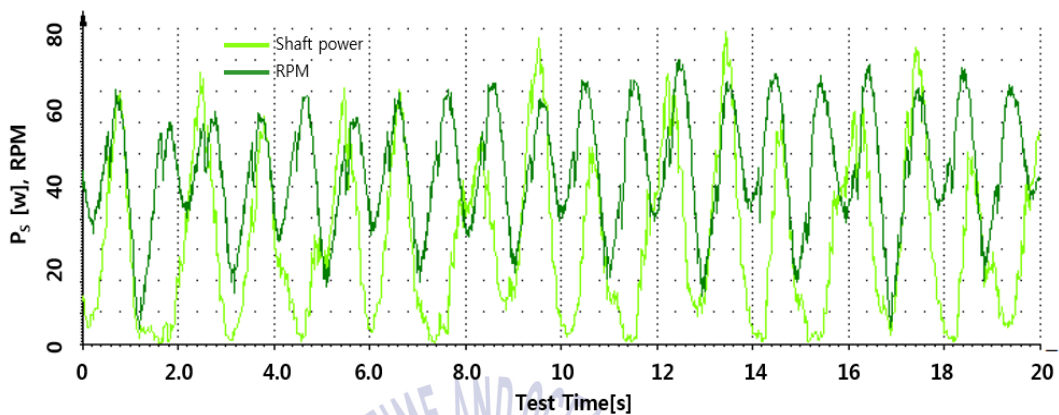


Fig. 5.11 Time series data at irregular wave (JONSWAP spectrum) condition

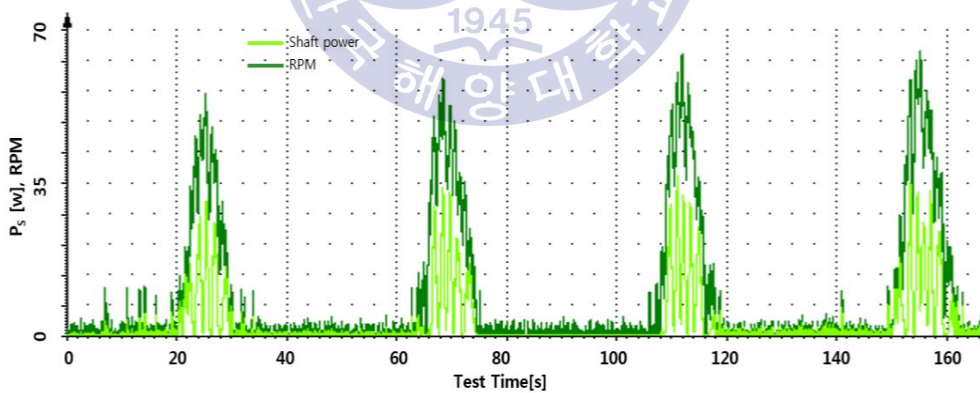


Fig. 5.12 Time series data at irregular wave (ITTC spectrum) condition

## 5.3 최적 설치수심 선정을 위한 파랑 모델 테스트

### 5.3.1 실험장치 제작 및 설치

실험을 위한 조파치는 길이 7.3m, 폭 1.8m, 높이 1m를 가지고 있다. 피스톤 타입의 조파장치가 설치되어 있으며 반사파를 제거 하기위한 Wave breaker 가 설치되었다. 최대 유의 파고는 0.3m 이며 그 파랑 주기는 0.1s~2s까지 가능하다. 아래 Fig. 5.13와 같은 위치로 장치가 설치되었으며 실제 파도 영역은 6m이다.

Fig. 5.14에 시험장치사진과 센서류들을 나타내었다. 파랑수조 실험에서 파도를 측정하기 위하여 초음파식 파고센서가 설치되었고, 효과적으로 파도의 반사파를 제거하기 위한 쇄파기, 내부 유동을 계측하기 위해서 압력 센서가 설치되었고, 센서의 데이터는 데이터 로거로 전송하여 저장하였다. 파력발전 장치의 동요를 계측하기 위한 6축 자이로 센서를 장치에 설치하여 모션을 계측하였고 센서의 각도에 대한 오차율은 0.1° 이다.

본 파력발전 장치는 실제 해역에 설치되는 파력발전 장치와 같은 6 자유도 모션을 가지고 있도록 하였으며 본 실험장치의 U-tube형상은 Fig. 5.15에 나타내었다. 장치 전체 폭은 0.6m이며 위 부분에 10°의 경사각을 가지도록 설계하였다. 또한 Fig. 5.16의 터빈의 세부형상은 외부 지름은 91mm, 내부 지름은 60mm로 설계하였으며, 터빈 블레이드 개수는 총 24개이다. 터빈의 경우 축소 모형 형태로 제작하기 곤란하였기 때문에 기존 설계형상에서 블레이드 개수가 변경되어 기존 블레이드 개수 30개에 비교하여 6개의 블레이드 개수를 줄여 제작하였다. (Kim, et al., 2015)

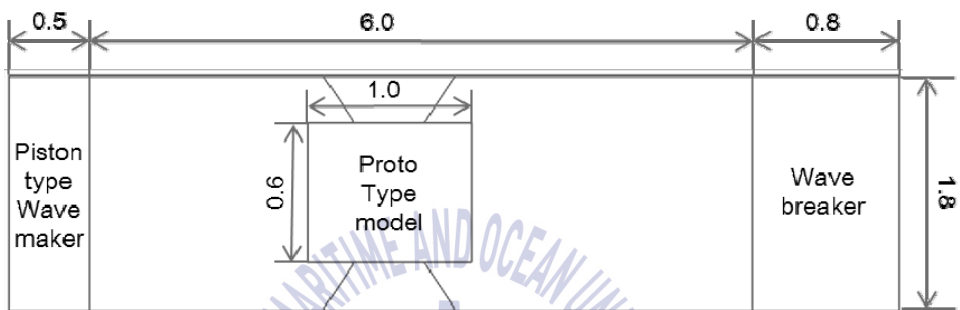


Fig. 5.13 Top schematic view of the wave energy converter and location of test device

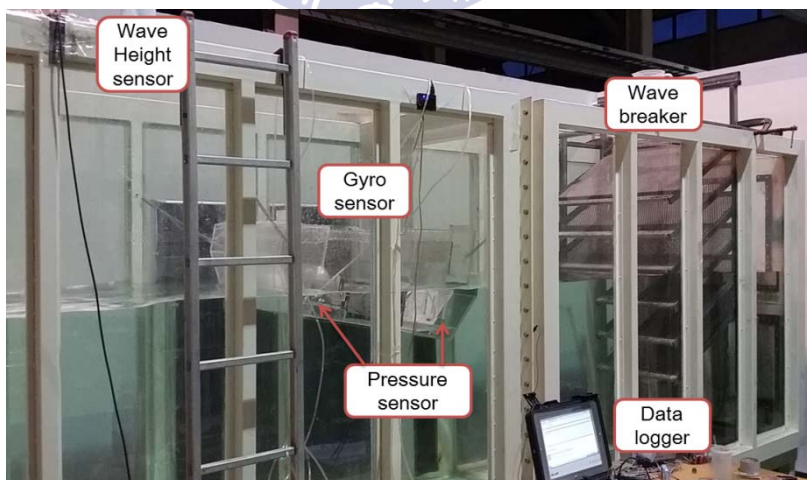


Fig 5.14 Overall view of experimental setup

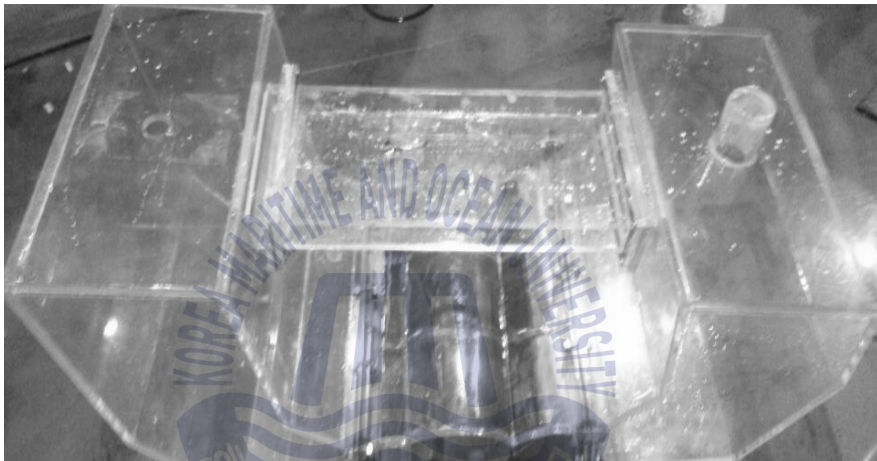


Fig. 5.15 Wireframe model of WEC

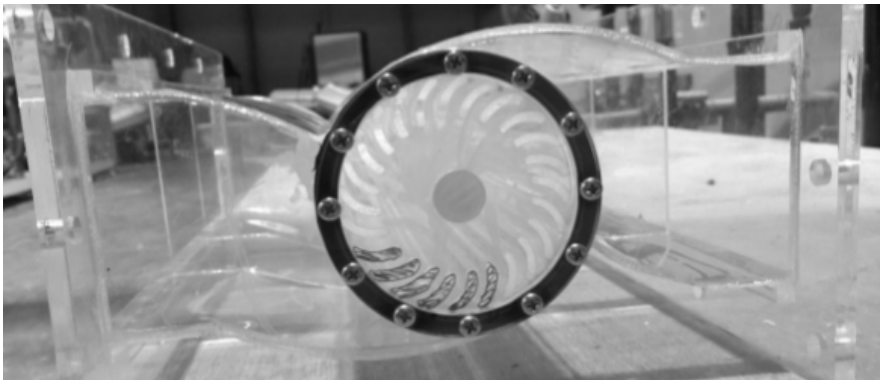


Fig. 5.16 Nozzle and cross-flow turbine setup

모든 실험은 정현파 상에서 시험을 진행하였고 각 실험조건들은 1분씩 계측을 수행하였고 반사파가 발생하는 영역은 제거하였다. 총 42개의 조건들을 가지고 실험하였다. 이에 대한 시험조건을 Table 5.12에 나타내었다.

**Table 5.12** Wave height and wave length of tested wave condition

Wave condition	1	2	3	4	5	6
$\lambda$ [m]	1.4	1.7	2.0	2.3	2.6	3.0
Hs [m]	0.01	0.04	0.07	0.1	0.13	0.16

파도의 파장은 주기와 수심에 의해 결정되며 그 식은 아래와 같다.

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (5.2)$$

여기서 T는 파도 주기, h는 수심을 나타낸다.

### 5.3.2 실험 결과

본 실험의 중요한 목적은 파고와 파장을 이용하여 장치의 길이에 대한 파장의 비에 대하여 실험역 파랑데이터를 바탕으로 수심을 선정하기 위함이다.

이를 위해 다양한 파장 조건의 파도들에서 실험이 진행 되었고 터빈의 형상이 장치의 크기에 의하여 변경되었기 때문에 RPM만을 계측하였다. Fig. 5.17 그래프에서 전체적인 결과를 보여주고 있으며 각 파장조건에서 파고에 따른 터빈의 회전 속도를 알아보았다.  $\lambda/L$ (파장과 장치길이의 비)가 2.6일 때, 가장 높은 터빈 회전 응답을 얻을 수 있었으며,  $\lambda/L$ 이 2.0, 2.3에서도 높은 터빈 회전수를 얻을 수 있었다.

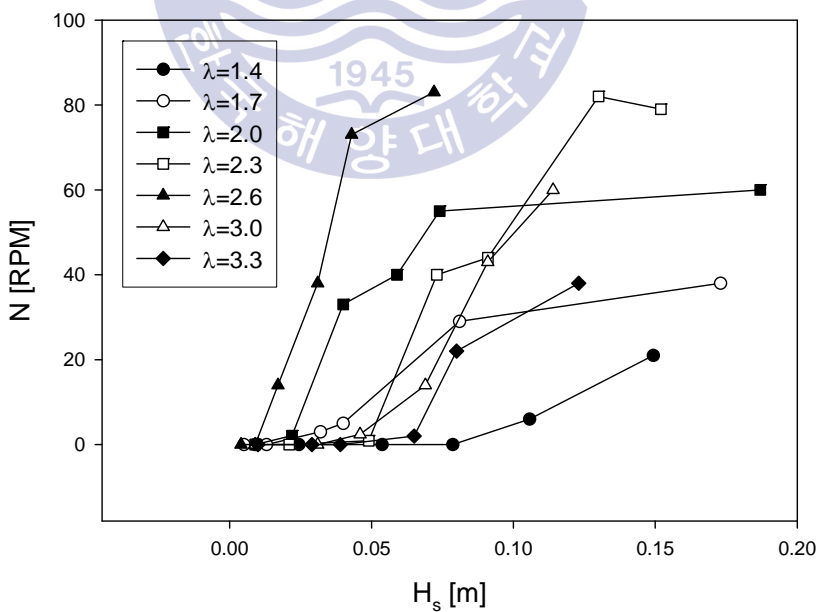


Fig. 5.17 Plot of  $N$  according to  $H_s$  at each  $\lambda$  conditions

Fig. 5.18은 Pitch각과 Heave 진폭을 나타낸 그래프이다. 비슷한 파고 대에서 파고가 다른 경우, 터빈 회전수를 나타내고 있다. 파고가 0.08m, 파장이 1.4m일 때, 터빈의 회전수는 0rpm으로 나타났으며, 파고가 0.07m이며 파장이 2.6m일 때, 터빈의 회전수가 83rpm으로 나타났다. 이때, 파장이 1.4m일 때,  $4.75^\circ$ 의 피칭 각이 측정되었고, 파장이 2.6m인 조건에서는  $16^\circ$ 의 피칭각이 측정되었다.

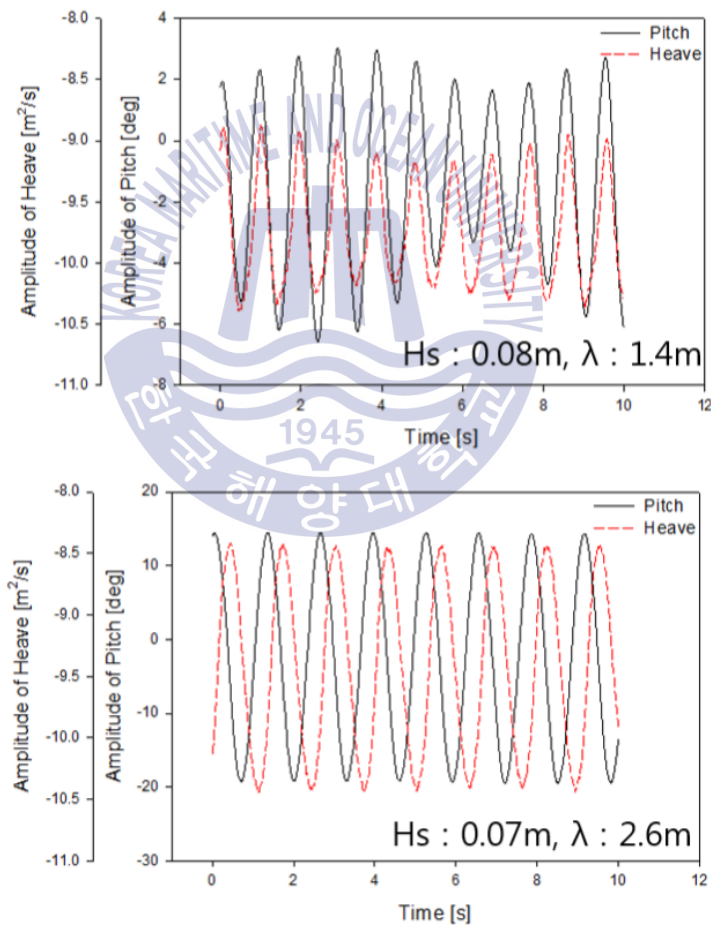


Fig. 5.18 Time series data of the pitching angle and heaving amplitude at different  $\lambda$



높은 응답 회전수를 나타낸 파장영역에서 Fig. 5.19 그래프는 피칭각의 비교를 나타내었으며, Fig. 5.20는 상하진폭의 비교를 나타내었다. 파장이 2.3m, 파고 0.07m일 때, 터빈회전수는 40rpm을 나타내었으며, 파장이 2.6m이고 파고가 0.07m일 때, 터빈회전수 83rpm으로 나타났다. 이 때 피칭 각이 각각  $14^\circ$ ,  $18^\circ$ 로 나타나며 피칭 각도의 차이가 터빈회전수의 차이를 만들어 낸다는 것을 알 수 있다. 하단의 Fig. 5.20에서 히빙 모션은 두 조건 모두 큰 차이를 가지지 않는다. 이처럼 적정 파장대에서 파력발전장치의 모션이 크게 차이나는 것을 알 수 있으며 최대 피칭각도를 만들어내는 2.6m의 파장이 최적인 것을 알 수 있다.

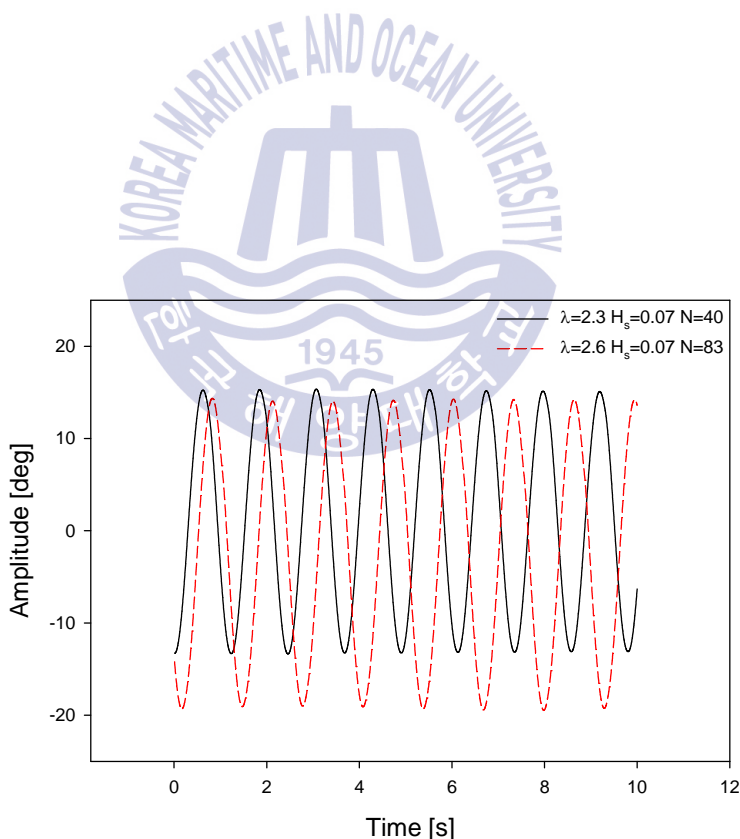
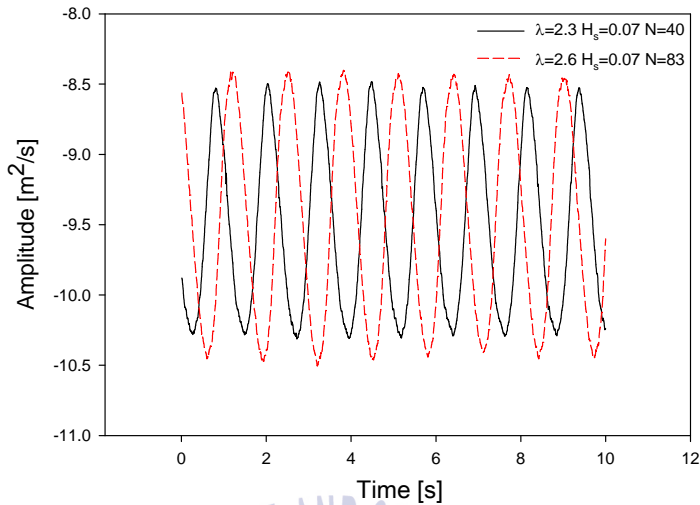


Fig. 5.19 Comparison of pitching amplitude plotted versus time for  $\lambda$  of 2.3 m and 2.6 m



**Fig. 5.20** Heaving amplitude (right) plotted versus time for  $\lambda$  of 2.3 m and 2.6 m

본 실험에서 사용된 장치의 길이는 1m이며 이 장치의 최적 파장은 2.6m이다. 최적의 터빈회전수를 가지는 장치의 길이와 파장의 비는 2.6인 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 활용하여 Froude수를 적용하여 장치 길이에 대한 최적 수심을 도출해 낼 수 있다. Table 5.13은 장치의 주기별 수심에 따른 파장의 길이를 알 수 있다.

**Table 5.13** Optimum length of WEC device for operation at different wave conditions

Sea state		Water depth, h[m]				
		10	9	8	7	6
$T_P$ [s]	7	23.1m	22.2m	21.2m	20.2m	19.0m
	6	18.6m	18.1m	17.4m	16.6m	15.7m
	5	14.1m	13.8m	13.4m	13.0m	12.4m
	4	9.5m	9.4m	9.3m	9.2m	8.9m
	3	5.6m	5.4m	5.4m	5.4m	5.3m

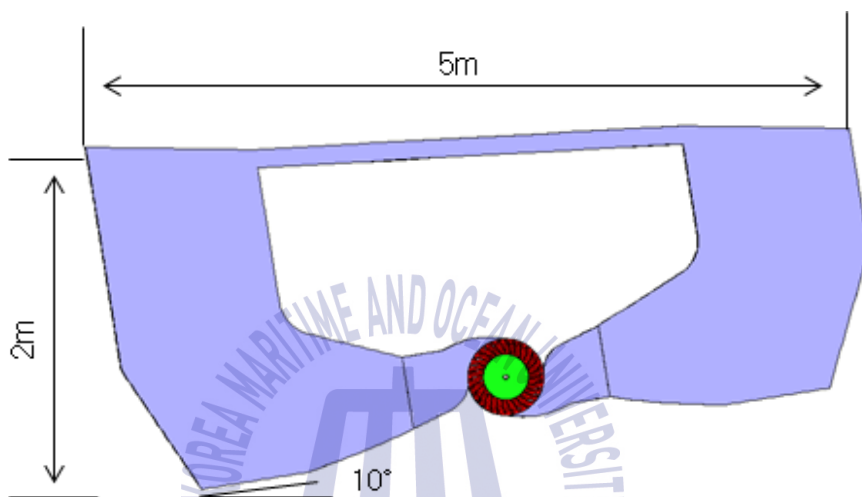
## 제 6 장 실험역 파력발전장치 설계 및 시험

### 6.1 실험역 PTO 시스템 유동해석

#### 6.1.1 실험역 PTO 시스템 유동해석 모델

실험역 시험장치의 용량 선정을 위하여 PTO내부유동 모델의 해석을 수행하였다. 해석을 통하여 장치의 폭방향 길이에 따른 출력량, 최적 회전수를 도출하였다. 해석모델은 실험역 시험장치의 U-tank와 동일한 치수로 하였으며, 2D해석을 수행하기 위하여 단위 폭은 0.1m로 모델링하였다. 1차적으로 U-tank의 바닥면이 실험장치와 동일하게  $10^\circ$  기울어진 형상과 U-tank가 수평으로 위치한 2개의 모델에 대하여 계산을 수행하여 바닥면의 기울어짐에 따른 출력과 유동형태의 변화를 살펴보았으며,  $10^\circ$  기울어진 모델에 대하여 피칭각과 회전수를 변화시켜 해석을 수행하였다.

해석에 사용된 모델의 치수를 Fig. 6.1과 Table 6.1에 나타내었다. 장치의 길이방향은 5m이며, 탱크의 높이는 2m, 터빈의 직경은 0.52m로 설계하였으며, 해석모델의 폭은 0.1m로 하였다.



**Fig. 6.1** Fluid model for CFD analysis

**Table 6.1** Real sea model parameter for PTO analysis

Turbine Diameter	m	0.52
U-tank Hull Length	m	5
U-tank Hull Height	m	2
Bottom Angle	degree	10
Simulation Model Thickness	m	0.1

### 6.1.2 실험역 PTO 시스템 유동해석 격자계

해석 모델의 격자는 Fig. 6.2에 나타내었다. 해석 모델의 도메인은 터빈영역과 U-tank영역의 Multi-block으로 구성하였으며, 격자 생성은 ANSYS ICEM CFD를 통하여 Hexahedral의 정렬 격자로 구성하였다. Table 6.2에 격자의 각각의 블록에 대한 노드수를 나타내었다. 해석 격자계의 총 노드 수는 47만 노드로 구성하였으며, 총 요소 수는 35만개로 구성하였다.

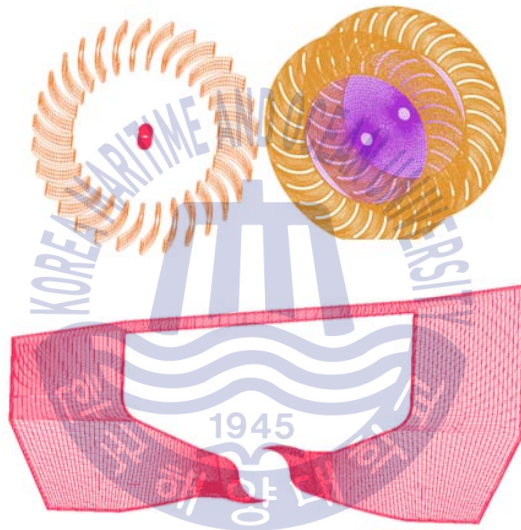


Fig. 6.2 Mesh of PTO analysis for real sea model

Table 6.2 Mesh statistics for real sea PTO numerical model

Number of nodes	Turbine	285,042
	U-tank	185,430
Number of elements	Turbine	205,840
	U-tank	148,626
Meshing Method		Multi-block Hexahedral

### 6.1.3 실험역 PTO 시스템 유동해석 경계조건

실험역 모델의 PTO시스템 유동해석 경계조건을 Table 6.3에 나타내었다. 본 해석에서는 난류모델로  $k-\omega$  계열의 Shear stress transport(SST) 난류모델을 활용하였으며, 자유표면 및 중력가속도 조건의 적용을 위하여 물과 공기의 2상 유동 경계조건을 삽입하고, 자유표면의 효과를 확인하기 위하여 Free surface모델 및 표면장력 계수를 삽입하였다. 수위는 바닥면부터 1.6m의 정수압 조건을 적용하였으며 단위 해석 시간은 0.01s로 1000step의 계산을 수행하여 총 해석시간은 10s를 시뮬레이션 하였다. 바닥면 기울기의 영향을 확인하기 위한 모델에서는 터빈의 회전수를 20RPM, 피칭주기는 5s로 설정하였으며, 터빈성능해석 모델의 경우 10~20RPM까지 회전수를 변경하여 해석을 수행하였으며, 피칭주기는 5s와 6s를 두 개의 주기조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

**Table 6.3** Boundary condition for real sea PTO numerical model

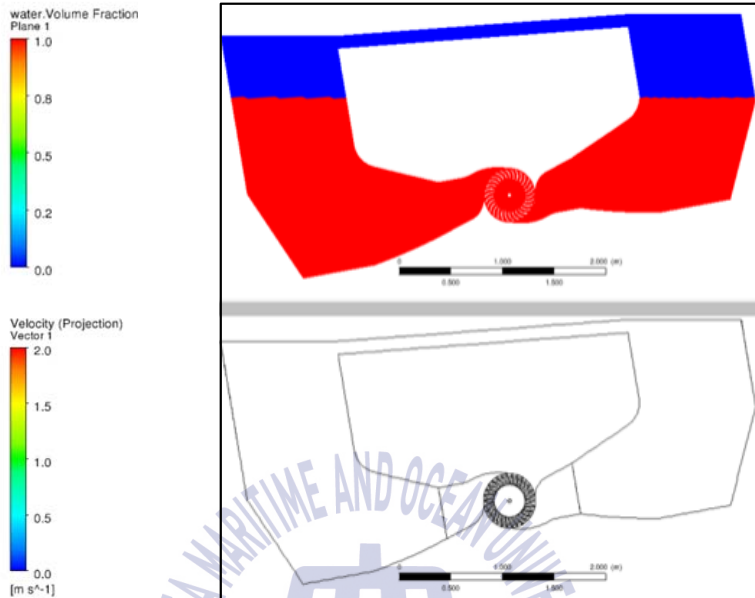
Analysis type	Transient
Turbulence model	$k-\omega$ SST model
Turbine rotation speed	20RPM(angle effect analysis model), 10~20RPM (turbine performance analysis)
U-tank water level	1.6m
Inter phase transfer	Free surface model
Fluid	Air and water
Pitching period	5 s (angle effect analysis model) 5s and 6s (turbine performance analysis)

#### 6.1.4 내부유동모델의 바닥면 각 변화에 따른 실험역 PTO 시스템 유동해석 결과

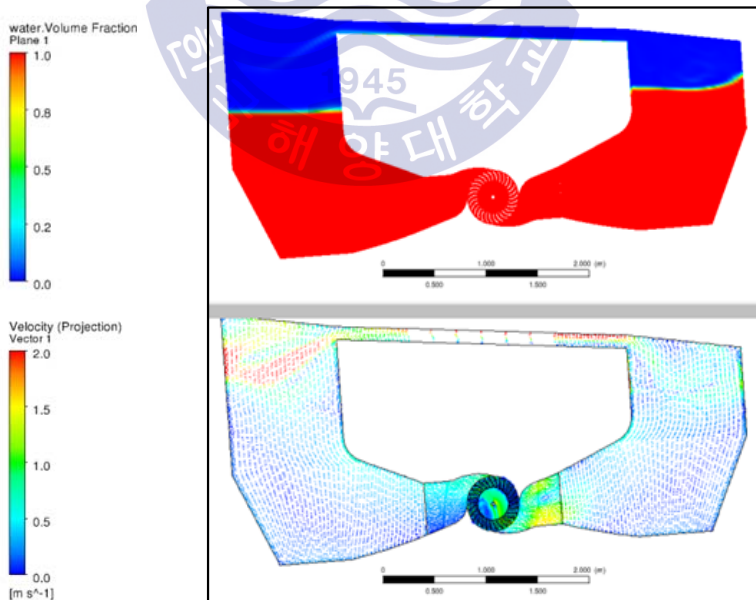
U-tank바닥면이 평평한 모델과  $10^\circ$  기울어진 모델의 내부유동영향을 확인하기 위한 해석 결과를 나타내었다. Fig. 6.3는  $10^\circ$  기울어진 모델의 내부 VoF와 속도장을, Fig. 59은 바닥이 플랫한 모델의 내부 Water Volume Fraction(VoF)과 속도장을 시간에 따라 컨투어로 나타내었다. 바닥면의 각도에 따른 모델을 비교하면 가장 큰 차이점은 U-tank양단의 자유표면의 슬로싱 현상의 유무라 할 수 있다. Fig. 6.3의 (c)와 (d)의 Water VoF 컨투어를 확인하여 보면 전단 챔버의 자유표면에 유체의 슬로싱 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 바닥면이 평평한 Fig. 6.4의 Water VoF에서는 이러한 슬로싱 현상이 발생되지 않는 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 LNG선박 등에서의 슬로싱 현상의 발생 시 내부 탱크의 벽면에 유체가 부딪혀 내부 벽면에 손상을 발생시키지만 본 장치의 경우 내부 유체의 양이 크지 않기 때문에 내구도에 대한 영향은 무시할 수 있을 것으로 여겨진다. 또한 두 조건에 대하여 내부 유체의 속도장을 확인하면,  $10^\circ$  기울어진 모델의 유동장의 속도벡터가 빠른 것을 확인할 수 있으며, 두 모델을 비교하여 유량에 대한 시계열 그래프를 Fig. 6.5에 나타내었다. 터빈을 지나는 내부의 유량을 나타내어 비교하였으며  $10^\circ$  기울어진 모델의 유량이 최대 100kg/s를 나타내었으며, Flat한 모델의 유량은 95kg/s를 나타내었다. 이에 따른 최대 출력량 차이는 7%의 차이를 나타내는 것을 Fig. 6.6 그래프에서 확인할 수 있다.  $10^\circ$  기울어진 외부선체의 선체 응답성능이 더욱 높고 이에 따른 내부 U-tank의 형상변경으로 인한 영향으로 슬로싱 현상이 발생하나 출력이나 효율적인 측면으로 보았을 때에는 더욱 높은 성능을 나타내기 때문에 형상변경으로 인한 문제점은 발생하지 않을 것으로 보인다.

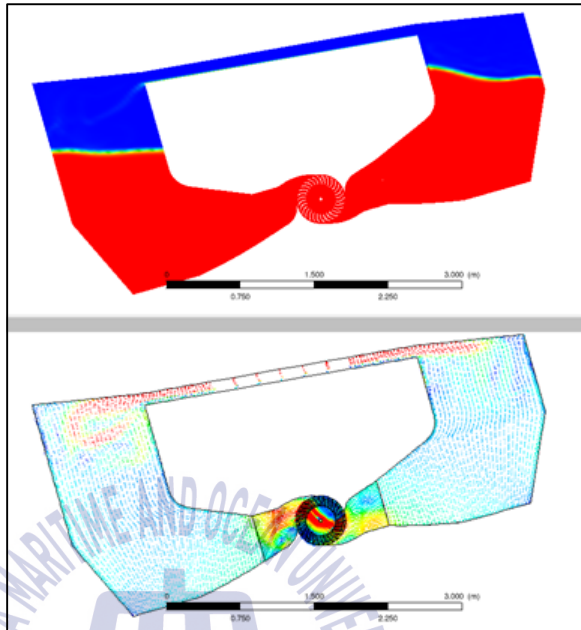
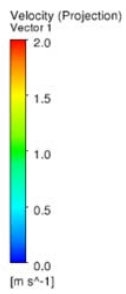
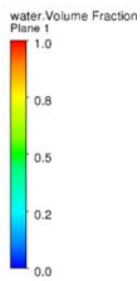




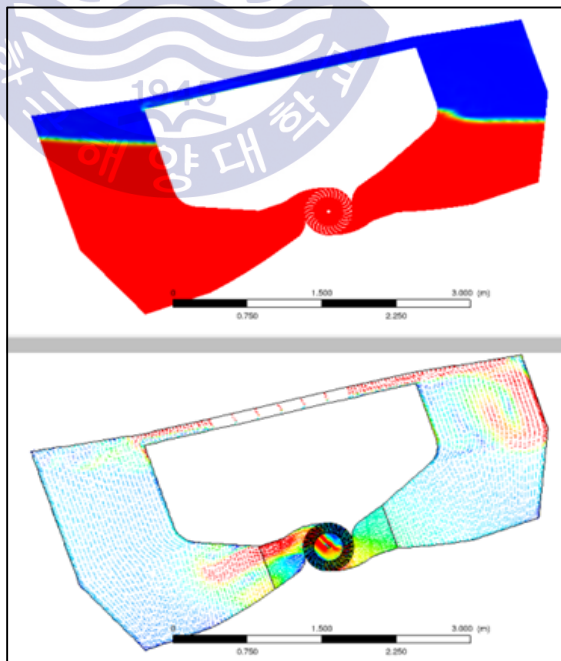
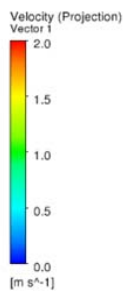
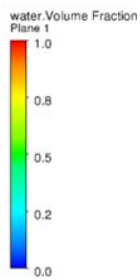
(a) 0 seconds



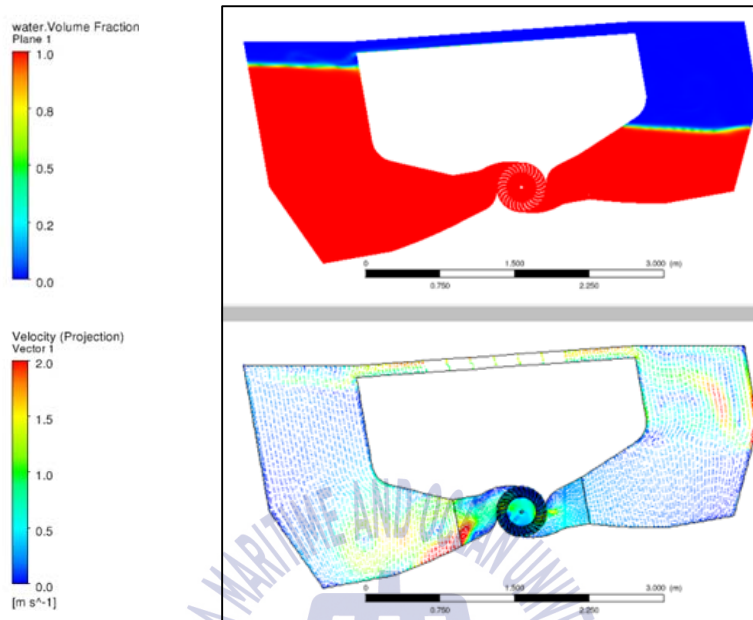
(b) 2 seconds



(c) 3 seconds

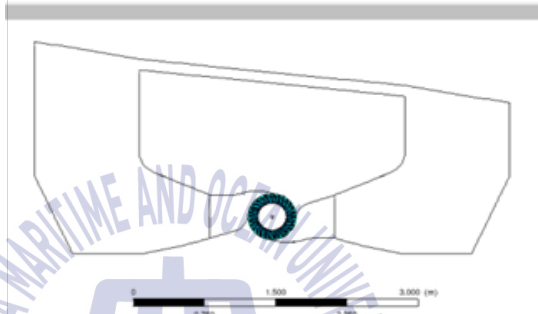
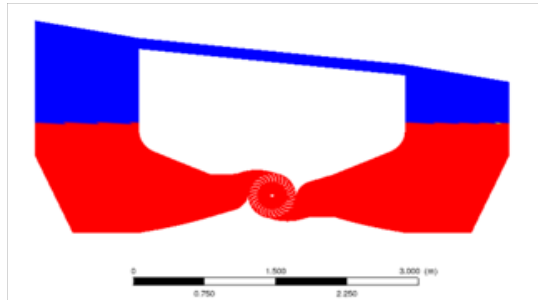
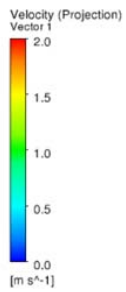
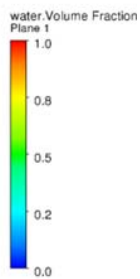


(d) 4 seconds

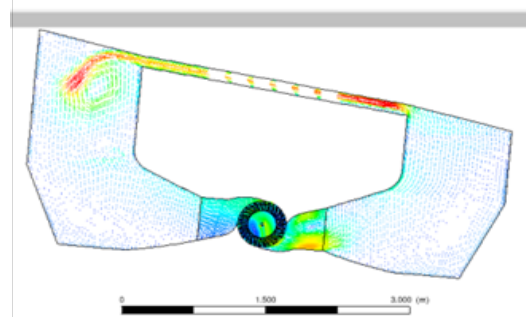
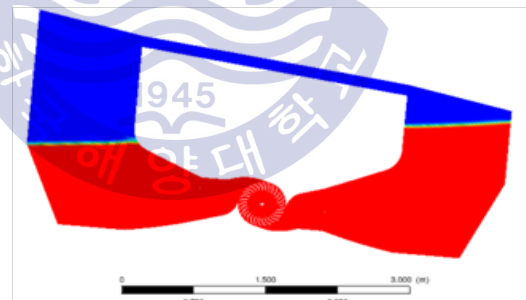
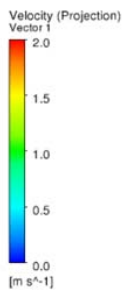
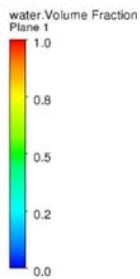


(e) 5 seconds

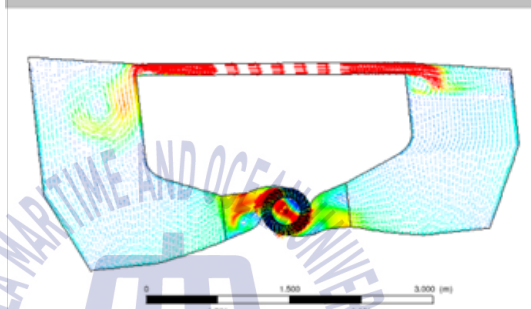
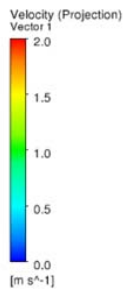
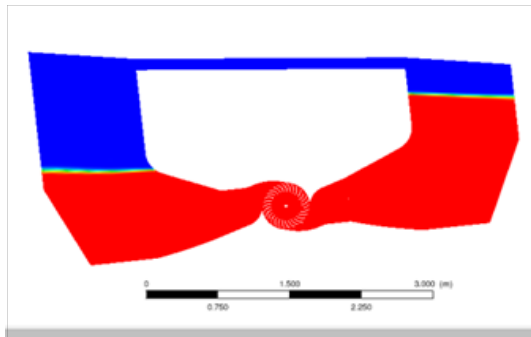
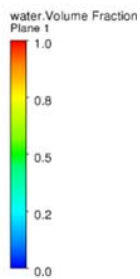
Fig. 6.3 Velocity field and VoF of model with bottom 10degree



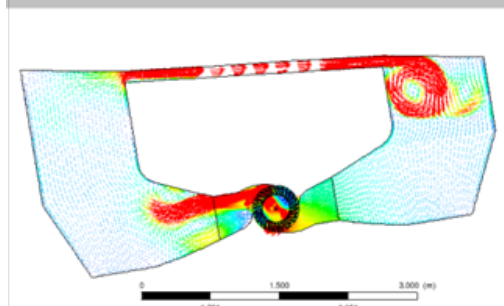
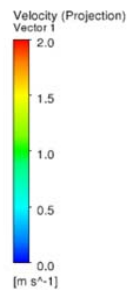
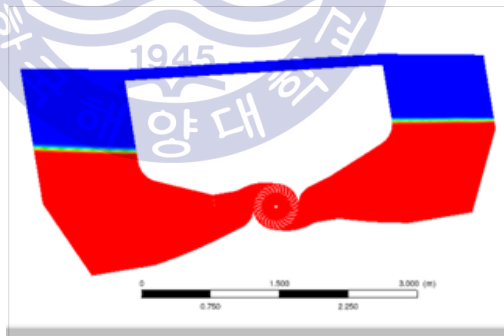
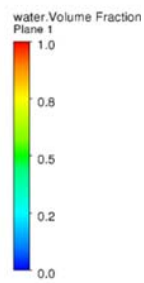
(a) 0 seconds



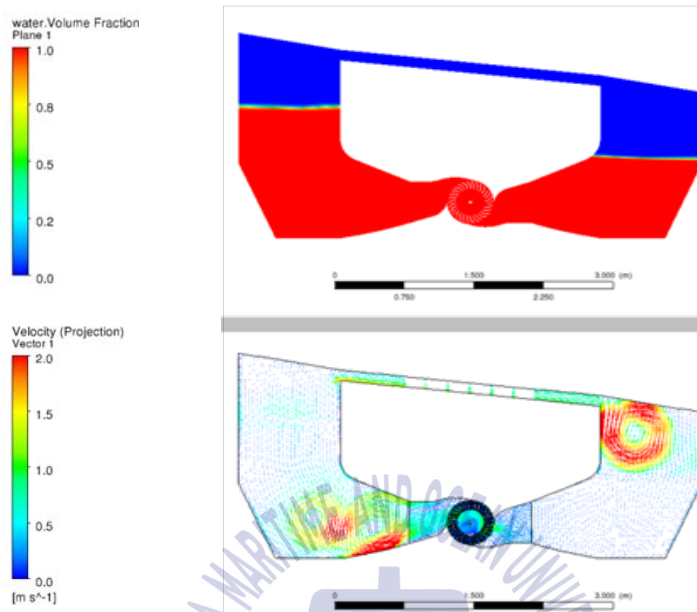
(b) 2 seconds



(c) 3 seconds



(d) 4 seconds



(e) 5 seconds

Fig. 6.4 Velocity field and VoF of model with Flat bottom

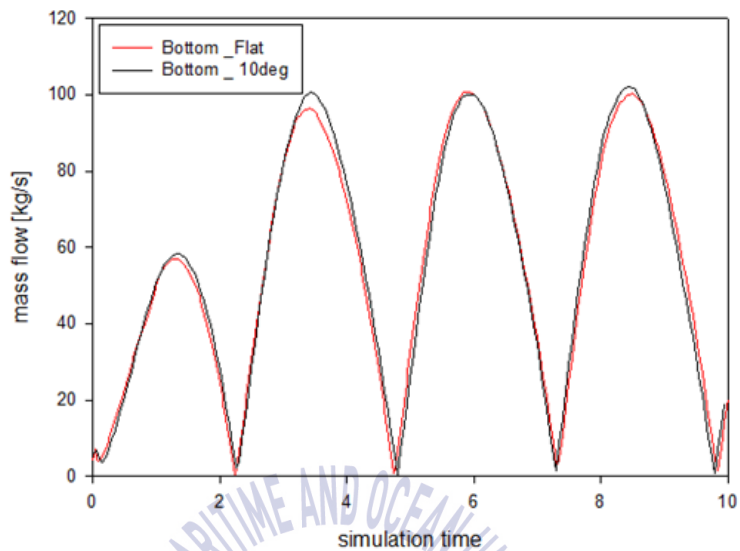


Fig. 6.5 Graph of flow rate comparing flat bottom and 10degree model

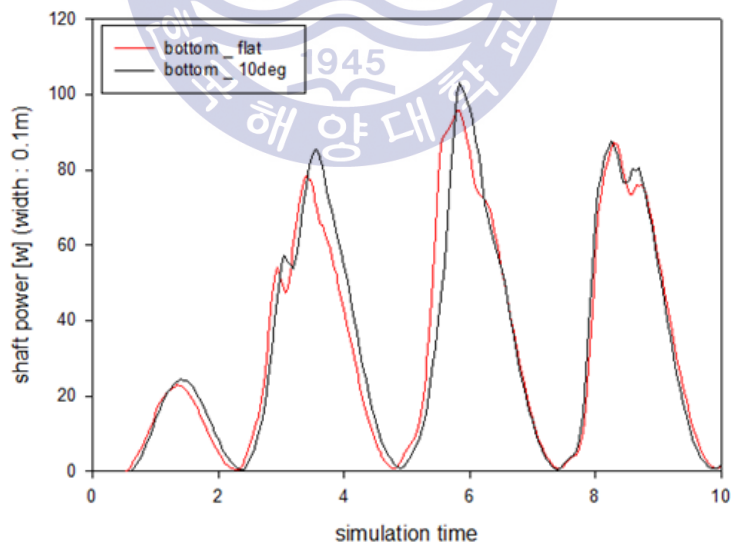


Fig. 6.6 Graph of  $P_s$  comparing flat bottom and 10degree model



### 6.1.5 내부유동모델의 Pitching 각과 Pitching 주기의 변화에 따른 실험 PTO 시스템 유동해석 결과

Fig. 6.7에 터빈의 출력을 나타내었다. 해석모델의 장치의 폭은 0.1m이나 실험 모델의 두께인 1.0m로 환산하여 그래프로 표현하였다. 장치의 최대 출력은 서로 다른 Pitching angle인  $7^{\circ}$ ,  $9^{\circ}$ ,  $11^{\circ}$ ,  $13^{\circ}$  일 때, 동일하게 14RPM일 때, 가장 높은 출력을 나타내었다. 최대 출력은 14RPM,  $13^{\circ}$  일 때, 495W의 출력을 나타냈으며,  $11^{\circ}$  일 때 375W,  $9^{\circ}$  일 때 270W,  $7^{\circ}$  일 때 180W의 출력을 나타냈다. 터빈의 회전수가 변동이 있다 하더라도 전체적인 회전 변화에 따른 성능 변화는 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 양방향 횡류터빈의 특성인 이러한 특징은 불규칙한 해상 상황에 따라 부하량의 변동에 따라 회전수의 변화가 심한 상황에서 일정 이상의 성능을 확보할 수 있다는 장점을 가질 수 있다.

Fig. 6.8은 Pitching 주기를 4s로 해석한 터빈성능 그래프이다. 이 그래프에서도 주기 5s의 그래프와 마찬가지로 14RPM에서의 성능이 높은 것을 확인할 수 있으며, 출력량이 5s 대비 25% 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 주기가 짧아짐으로 인하여 양방향 흐름이 생성되고 U-tank양단에 생성된 수두에 따른 유량이 이동할 시간이 짧아지게 된다. 이 때문에 단위시간(피칭주기)안에 유량이 이동할 시간이 충분하지 못하기 때문에 출력이 저감되어 수류가 가진 에너지의 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 주기 4s의 최대 출력은  $13^{\circ}$ , 14RPM일 때 407W의 출력량을 발생시키며  $11^{\circ}$ , 14RPM에서 303W의 출력량,  $9^{\circ}$ , 14RPM에서 270W,  $7^{\circ}$ , 14RPM에서 170W의 출력량을 나타내었다.

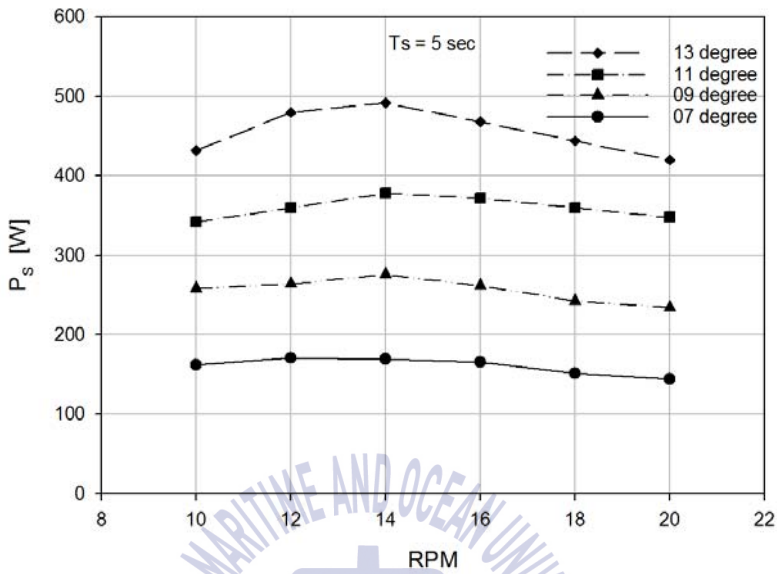


Fig. 6.7 Power of PTO analysis model at 5 seconds

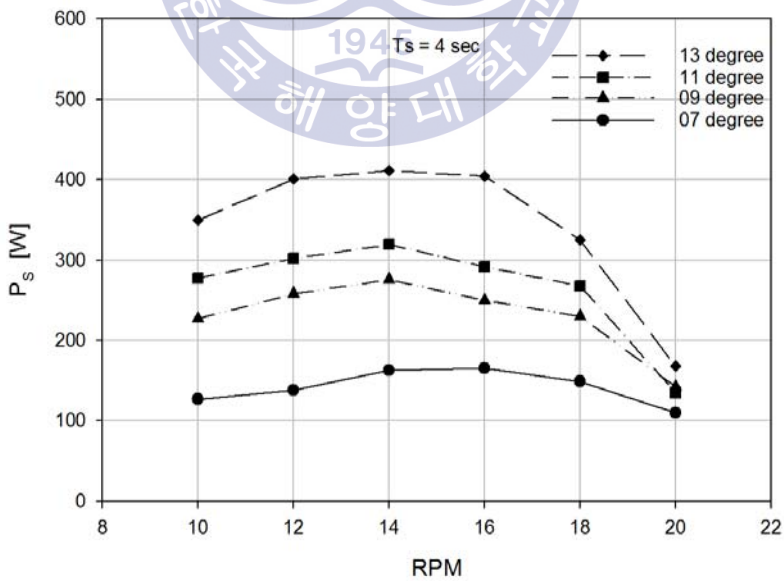


Fig. 6.8 Power of PTO analysis model at 4 seconds

## 6.2 계류 시스템 설계

계류시스템을 선정하기 위해서는 가장 우선적으로 고려해야 할 영역이 장치가 설치될 수심을 선정하는 것에 있다.

Fig. 6.9는 수심에 따른 파도의 상태를 나타내었다. 수심과 파장의 비가 1/2 이상이면 심해영역으로 판단하고 수심과 파장이 비가 5%이하이면 천해영역이라 한다. 이 심해영역과 천해영역의 중간 수심을 전이수역이라 칭한다.

이러한 수심영역에 따라서 계류방식이 달라지며 일반적인 Offshore플랫폼의 경우 천해영역일 때, All chain mooring method를 사용하거나 Articulated tower를 설치하여 고정한다. 전이영역의 경우, 일반적으로 High strength chain을 이용하여 계류를 한다. 또한 심해영역의 경우, 체인과 와이어를 혼합하여 활용하거나 전체 계류시스템을 와이어만을 이용하여 구성한다. 이에 더하여 초심해영역의 경우, Synthetic fiber rope mooring 방법을 활용하거나 Compliant vertical tension-leg mooring, 또는 무어링 방식은 아니지만 선체를 해상에 안정적으로 유지시킬 수 있는 DP(Dynamic Positioning)를 이용하여 위치를 고정시킨다.

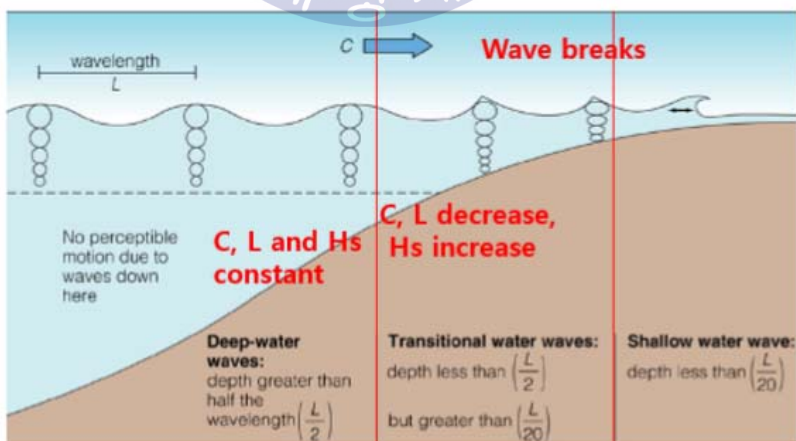


Fig. 6.9 Devices mooring according to water depth (Pizer, D, 1993)

일반적인 계류에 가장 많이 이용되는 체인의 경우, Fig. 6.10과 같이 Open link chain과 Stud link chain으로 나뉘며 Stud link chain의 경우 Open link chain보다 덜 엉키는 경향을 가지고 있다.

체인의 경우 음극부식과 균열에 의하여 파손되어 질 수 있고 장시간 설치 시 해상부착물 등으로 인하여 링크되어진 전환의 회전이 제한될 수 있다. 하지만 체인시스템의 장점은 근해에서 내구성이 더 좋으며, 바닥마모에 강하다는 장점을 가지고 있다.

Fig. 6.11은 와이어로프의 종류를 나타내었으며 합성로프는 일반적으로 섬유로프로써 폴리에스테르, 아라미드, HMPE, 나일론 등이 주로 쓰인다. 이러한 와이어로프의 장점으로는 체인시스템에 비하여 무게가 거의 나가지 않아 깊은 수심에서 복원력이 높다는 장점을 가지고 있으나 장시간 설치시 Re-tensioning이 필요할 수 있고, 슬랙현상, 극단적인 폭풍이나 태풍 등의 극한 조건에서 약하며 단단한 해저에서의 마모가 크다. 또한 유지보수가 주기적으로 필요하고 물고기의 치아로 인한 손상 및 생물오손에 의한 훼손이 발생할 수 있다는 단점이 있다.(Harris, et al., 2004)

또한 계류시스템을 설계 시에는 다음의 사항들을 고려하여야 한다. 계류장의 수심, 부유체의 부력, 현장의 해저조건 및 바람, 파도, 해류 등으로 발생하는 계류장치에 부가되는 하중, 계류시스템의 마모 및 부식을 일으킬 수 있는 지역적인 조건, 가격, 계류시스템의 수명을 고려하여 설계를 수행하여야 한다.

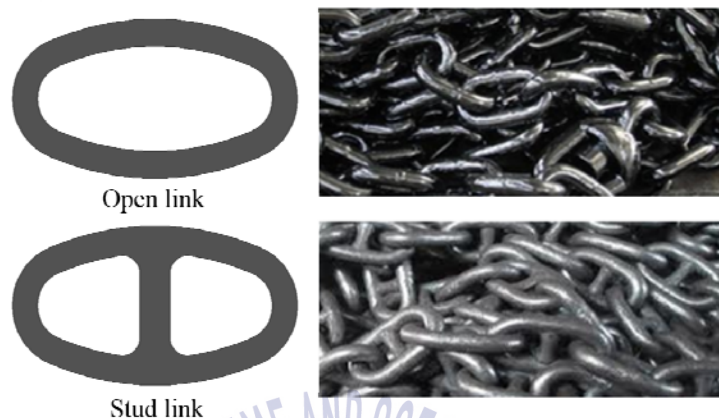


Fig. 6.10 Type of link chain

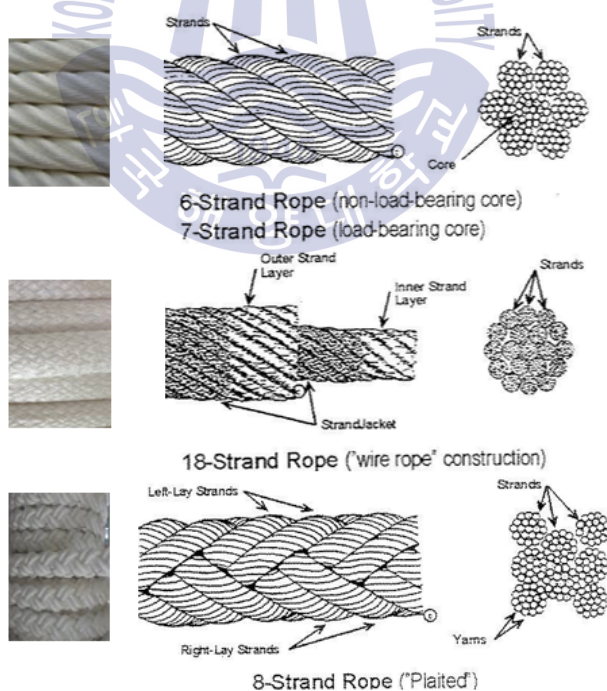


Fig. 6.11 Type of strand rope (Harris, et al., 2004)

### 6.2.1 계류 시스템 응답성능 해석 및 결과

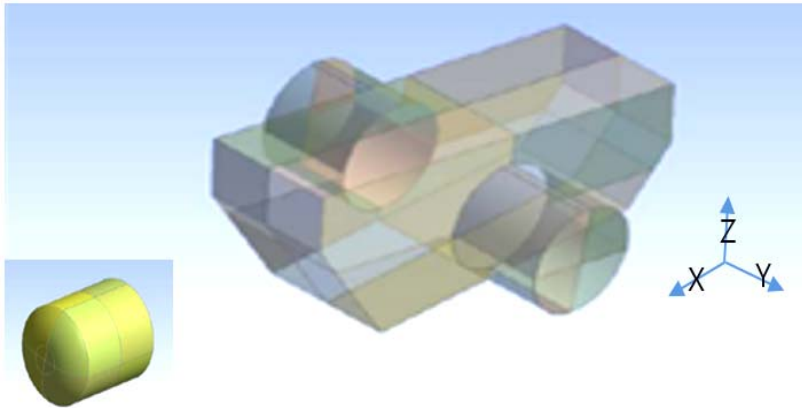
Fig. 6.12은 Hydrodynamic해석을 위한 형상 모델이다. 내부 청수의 이동에 따른 무게중심의 변화는 고려하지 않았다. 형상의 무게중심, 관성모멘트, 질량 등의 정보는 Fig. 6.13와 같이 3차원 모델링을 통하여 구하였으며, 이에 대한 값을 Table 6.4에 나타내었다. 파력발전장치 본체의 총 무게는 10톤이며  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$ ,  $I_{zz}$ ,  $I_{yz}$ 는 각각 23,171kgm<sup>2</sup>, 11,255kgm<sup>2</sup>, 27,081kgm<sup>2</sup>, -2736kgm<sup>2</sup>이다. Fig. 6.14는 Sway, Surge, Heave에 대한 RAOs(Response Amplitude Operations)를 나타내었다. 0.4Hz이상의 낮은 주파수 영역대에서 Sway가 일정하게 높은 응답성능을 나타냈으며, Sway는 낮은 주파수 대역에서는 거의 반응하지 않았다. 또한 부유체 응답성능에서 중요하게 확인될 필요가 있는 Heave응답성능은 0.2Hz(5s)이하로 갈수록 점점 응답성능이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 6.15의 그래프는 회전성분 즉, Pitch, Roll, Yaw의 RAOs를 나타낸 그래프이다. Roll과 Yaw는 0.4Hz이하의 낮은 영역에서 일정하게 높은 위상값을 가지는 것을 확인할 수 있고 파력발전장치의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 Pitch 응답성은 실험역 파랑계측 결과와 같이 0.2Hz 즉 5s에서 -100의 위상을 나타내는 것을 확인할 수 있으며 0.2Hz에서 0Hz영역에서 위상값이 -100부터 100까지 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 0.2Hz 대역에서는 내부흐름에 영향을 미치는 Heave가 작고 Pitch의 위상이 큰 것을 알 수 있으며, 본 장치의 Pitching 고유 주파수 대역은 0.2Hz근처인 것을 확인 할 수 있다.

Pitching 고유주파수 대역인 5s에 대하여 Moskowitz 불규칙 파랑 스펙트럼을 적용하여 시간응답해석을 수행하였으며, 수심은 설치 예정 위치와 같은 7m로 설정하였고, 유의파고( $H_s$ )는 0.8m로 설정하였다. 또한 Current 유속은 0.5m/s를 적용하였으며 풍속은 12m/s로 2hour의 시간을 적용하였으며 파력발전장치 전면으로 불어오도록 경계조건을 설정하여 총 300s에 대한 해석을 수행하였다. 이를 통하여 계산된 Pitch, Surge, Heave의 시계열 데이터(250s ~ 270s)를 Fig. 6.16, Fig. 6.17, Fig. 6.18에 나타내었다. 이를 통하여 계산된 Pitching 각의 진폭은 20°를 나타내어 높은 피칭각을 나타내었으며, 상대적으로 Surging

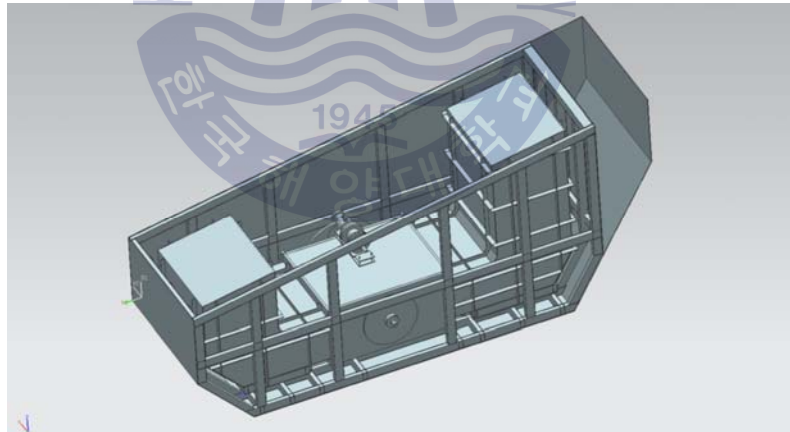


은 20s동안의 변동폭이 0.8m정도로 약하게 발생하였다. Fig. 6.17의 Heaving 변동폭은 0.8m인 유의파고 대비 약 0.3m로 약 60%의 파고대비 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 약 25m로 설정된 해저면부터 Buoy사이에 걸리는 장력은 3000N이하로 적게 나타났으며 Buoy-FWEC를 연결한 계류선에 걸리는 최대 장력은 약 10000N으로 높게 나타났는데 이는 일반적인 계류 방식의 경우 부유체를 구속하는 것에 그 목적을 가지나 파력발전장치는 발전을 하기 위한 모션의 응답성을 높여 놓았기 때문에 상대적으로 정지되어 있는 Buoy와 FWEC 본체가 높은 Pitching 운동을 나타내고 전면의 선체가 위로 올라가게 됨으로서 상대적으로 모션이 적은 부이와 연결과 계류선에 충격을 가하기 때문이다.





**Fig. 6.12** Hydrodynamic analysis model for real sea model



**Fig. 6.13** Calculating the center of gravity and mass property of a device through 3D modeling



**Table 6.4** General specifications of floater

FWEC device			
Device length		m	5.6
Device width		m	1.6
Device height		m	2.24
Device mass		kg	7,548
water mass(in U-tube tank)		kg	3,300
FWEC total mass		kg	10,848
Side buoy mass		kg	325
Side buoy diameter		m	1.5
FWEC side buoy diameter		m	1.7
FWEC moments of inertia	Ixx	kgm <sup>2</sup>	23171
	Iyy	kgm <sup>2</sup>	11255
	Izz	kgm <sup>2</sup>	27081
	Iyz	kgm <sup>2</sup>	-2736
	Ixz	kgm <sup>2</sup>	0
	Ixy	kgm <sup>2</sup>	0
Surface buoy			
Mooring buoy diameter		m	1.5
Mooring buoy length		m	1.7
Surface buoy Mass		kg	250

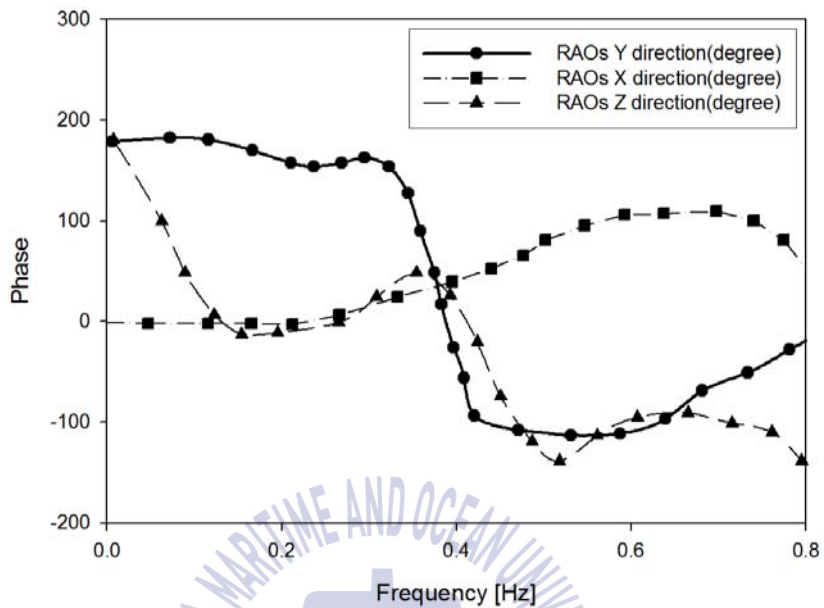


Fig. 6.14 RAOs in sway(X direction), surge(Y direction), heave(Z direction)

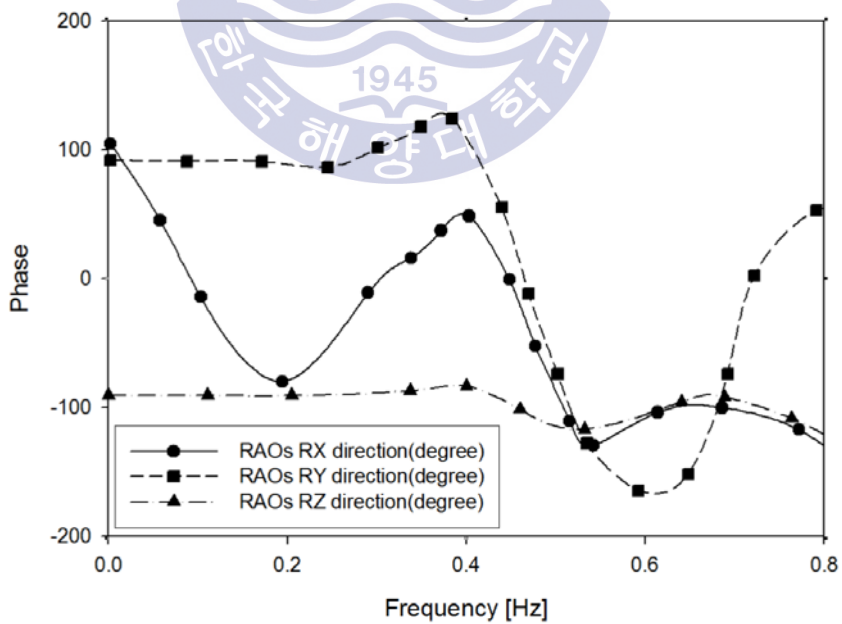


Fig. 6.15 RAOs in pitch(RX direction), roll(RY direction), yaw(RZ direction)

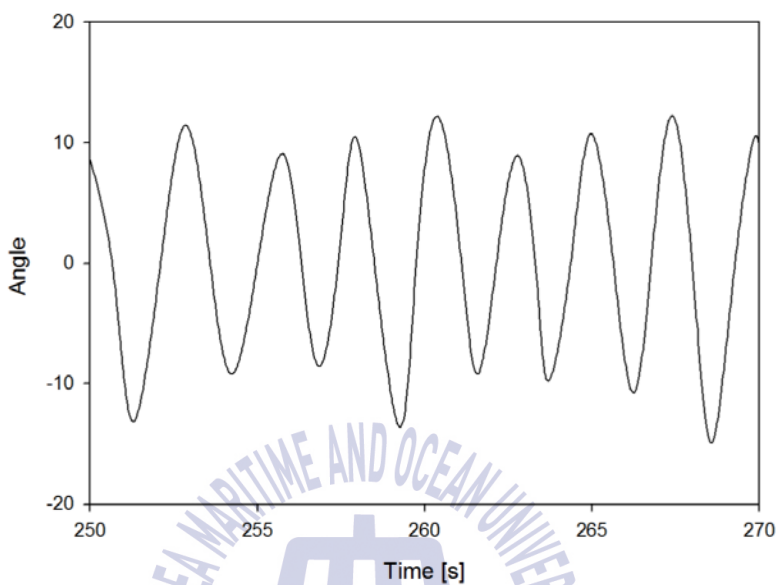


Fig. 6.16 Time series data of pitching angle from 250s to 270s

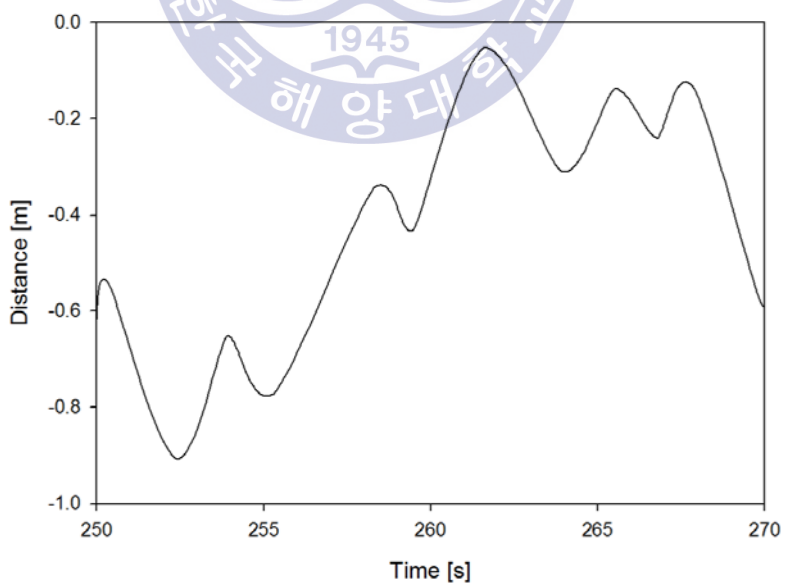


Fig. 6.17 Time series data of surge motion from 250s to 270s

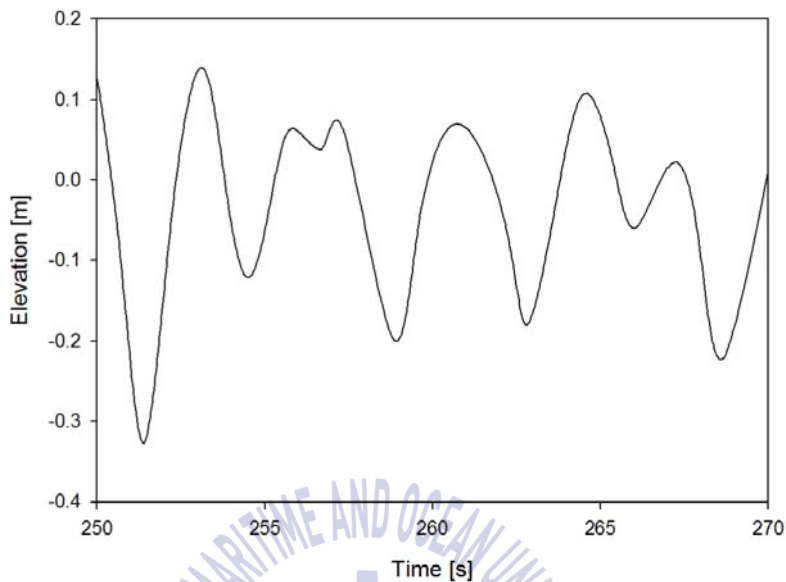


Fig. 6.18 Time series data of heaving motion from 250s to 270s

## 6.2.2 계류 시스템 설계

계류시스템 해석결과를 바탕으로 계류시스템을 구성하였으며 이에 대한 개략도를 Fig. 6.19에 나타내었으며 계류시스템의 세부사양을 Table 6.5에 표로 나타내었다. 중력식 앵커인 콘크리트 블록 6톤을 2개 연결하였으며 앵커와 부이의 연결은 Open link chain을 적용하였으며 체인의 두께는 25mm로 약 20kN의 힘을 견딜 수 있도록 하였다. 체인과 부이 사이에는 Swivel을 설치하여 체인의 꼬임이 덜 발생하도록 하였으며, Buoy와 FWEC 본체가 계류선의 무게에 따라 부딪히는 것을 방지하기 위하여 계류선을 가벼운 재질인 8-strand nylon 로프를 선정하였으며 이 방식의 경우, 상대적으로 연신율이 크기 때문에 충격하중을 적게 받을 수 있도록 하였다.

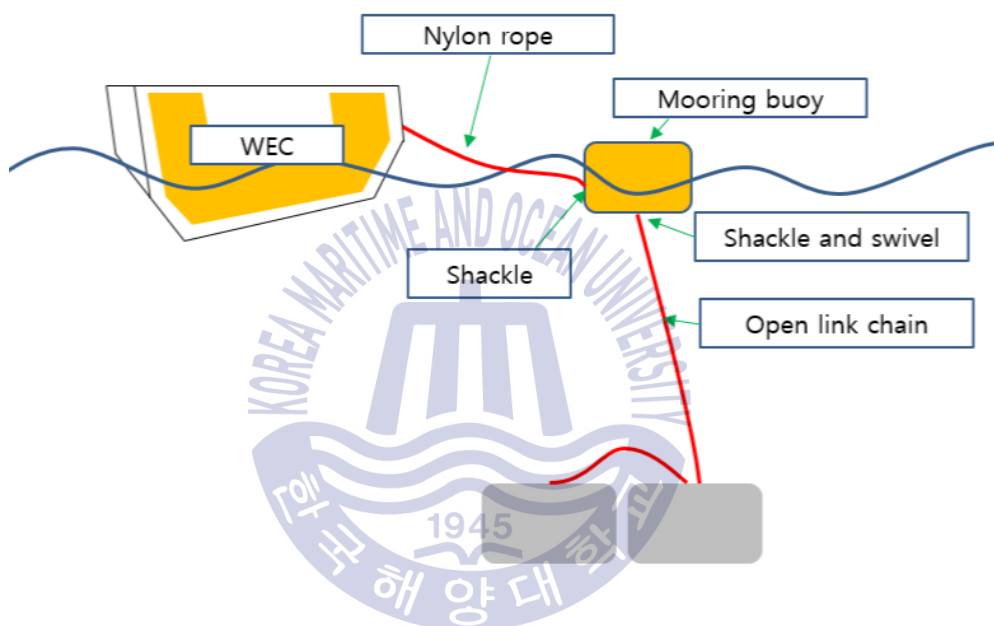


Fig. 6.19 1 point mooring method

Table 6.5 Mooring specifications

Mooring			
Open link chain	Thickness(d)	mm	25
	Length	m	20
Concrete block		ton	6 x 2ea (12ton)
8-strand nylon rope	Thickness	mm	40
	Length	m	12

### 6.3 실험역 시험장치 부유체

실험장치의 최적 장치 길이는 21m이다. 하지만 21m장치를 육상으로 운송하기가 현실적으로 불가능하였다. 이런 문제점 때문에 실험역 시험모델의 크기를 10ton카고 트럭에 실을 수 있는 크기로 스케일을 조정하였다. 차후 실험역 Pitlot스케일의 장치를 제작하기 위해서는 중공업업체나 도크를 가진 업체에서 제작을 수행하여야 한다. 1kW발전기 용량에 맞는 장치의 내부 챔버의 폭 또한 2.3m의 폭을 가져야 하지만 부가된 외부선체의 폭으로 인하여 일반 공도를 이송할 수 있는 폭은 1.6m의 최대 폭으로 설계하였다. U-tank 폭은 1.1m로 설계하여 기존에 1kW용량에는 부족하게 되었다.

이를 통하여 계산된 장치의 무게중심, 홀수, 모멘트 정보를 확인하였다. 하지만 장치의 폭과 길이가 줄어 기존 설계된 무게중심점과 복원력이 변화되었고 이를 설계치와 맞추기 위하여 Side buoy를 부착하여 무게중심 점과 복원력을 보강하였으며 Side buoy는 부착하지 않고 이송하여 현장에서 장치 본체와 결합하였다. 장치의 해상 설치는 1차 해역설치와 2차 해역설치 2회로 진행이 되었으며, 1차 해역 설치 당시 AF페인트가 아닌 일반 페인트가 도색되어 있어 장치 외부에 약 5cm가량의 해양 부착물이 양성되었다. 이에 2차 해역 시험에서는 Fig. 6.21에 나타난 것과 같이 장치의 선체에는 부착물을 제거하고 AF도색을 수행하여 해상 부착물 문제를 해결하였다. 장치의 길이는 5.6m, 폭은 1.6m, 높이는 2.24m로 설계되었으며 장치의 무게는 총 8.1ton이다. U-tank 내부에 청수와 평형수 탱크의 청수를 포함한 장치의 무게는 10.8Ton이다. Side buoy를 부착한 FWEC장치 이외에 별도로 제작된 Surface buoy는 250kg이며 폭은 1.7m, 지름은 1.5m로 제작되었다. Fig. 6.20은 제작되어 이송된 파력발전장치의 사진이다.



Fig. 6.20 Sea test equipment and buoy of FWEC



Fig. 6.21 Anti-biofouling painting management

#### 6.4 실험역 시험장치 내부 PTO 시스템

제작된 내부 PTO시스템의 사진을 Fig. 6.22에 나타내었다. 내부 U-tank의 폭은 1.1m이며 터빈의 축과 발전기의 축은 기어로 연결되었으며, 기어는 10:1 기어비를 적용하였다. 터빈과 연결된 발전기는 1kW 영구자석형 발전기를 사용하였으며 발전기의 사양을 Table 6.6에 나타내었다. 발전기의 출력은 AC 3상의 출력을 내며 정격 용량은 1,000W, 정격회전속도는 400RPM이다. 적용된 발전기의 무부하 실험상에서의 회전수에 따른 전압 그래프를 Fig. 6.23에 나타내었다. 발전기의 회전수에 따라서 전압이 선형적으로 증가하며 파력발전장치의 정격 회전수인 20RPM일 때, 증속기어를 거쳐 200RPM에서 발전기는 14V를 나타낸다. Fig. 6.24의 그래프는 정격회전속도에서 부하량의 변동에 따른 전압을 나타낸 그래프이다. 400RPM, 40A일 때, 전압은 25V, 발전량 1000W를 발생한다.



Fig. 6.22 Production of U-tank facility



**Table 6.6** 1kW generator specifications (Seoyoung tech. co)

Parameter	Symbol	units	
Rectified DC voltage	E	V	24
Generator output voltage			AC(3phase)
Rotor			Permanent magnet type
Stator			Coreless
Output power	$P_G$	W	1,000
Rated speed	$\omega$	RPM	400
Speed constant	$K_E$	V/krpm	70.4
Resistance	$R_T$	$\Omega$	0.087
Maximum winding temperature	$C_{Max}$	$^{\circ}C$	130
Number of pole	-	-	20
Weight	$W_G$	kg	18
Diameter	$M_D$	mm	272
Length	$M_L$	mm	93
Housing material	-	-	Aluminum
Shaft material	-	-	Steel

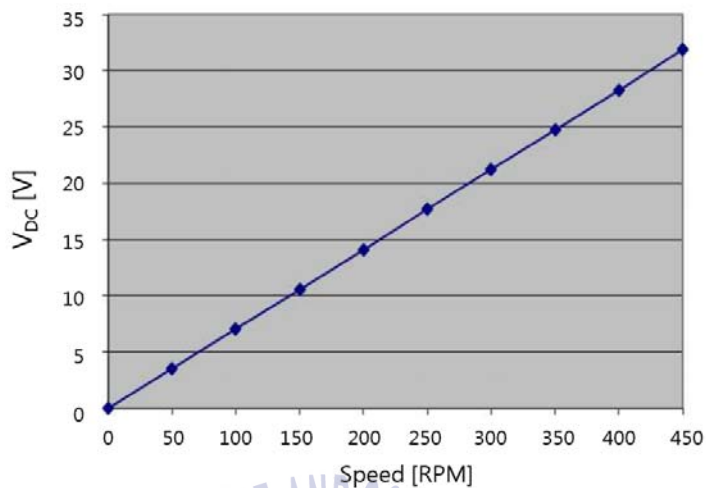


Fig. 6.23 Graph of voltage according to rotation speed of 1kW generator at no-load condition (Seoyoung tech. co)

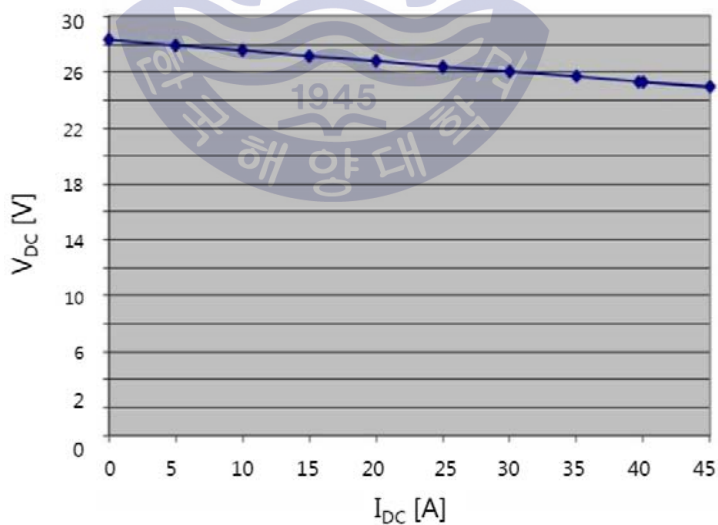


Fig. 6.24 Graph of voltage according to Current of 1kW generator at 400RPM (load) (Seoyoung tech. co)

## 6.5 계측 시스템 및 기타장치

Fig. 6.25는 실험장치의 전장을 나타내었다. Fig. 6.26에 나타난 것과 같이 선체의 상단에 200W PV패널을 이용하여 센서류 및 송신, 데이터 로깅 장치의 전원을 확보하였다. 또한 선체 외부에 무선 송수신 장치를 설치하였으며 선박 통행의 안전을 위하여 FWEC 상단 전후단에 야간 점멸등을 설치하여 선박통행 및 사고를 방지하였다. Fig. 6.27은 선체 내부사진으로 터빈에 연결된 발전기 및 토크센서, RPM센서를 나타내었다. Fig. 6.28은 전력의 계측, 변환을 담당하는 컨트롤 패널을 나타내었다.

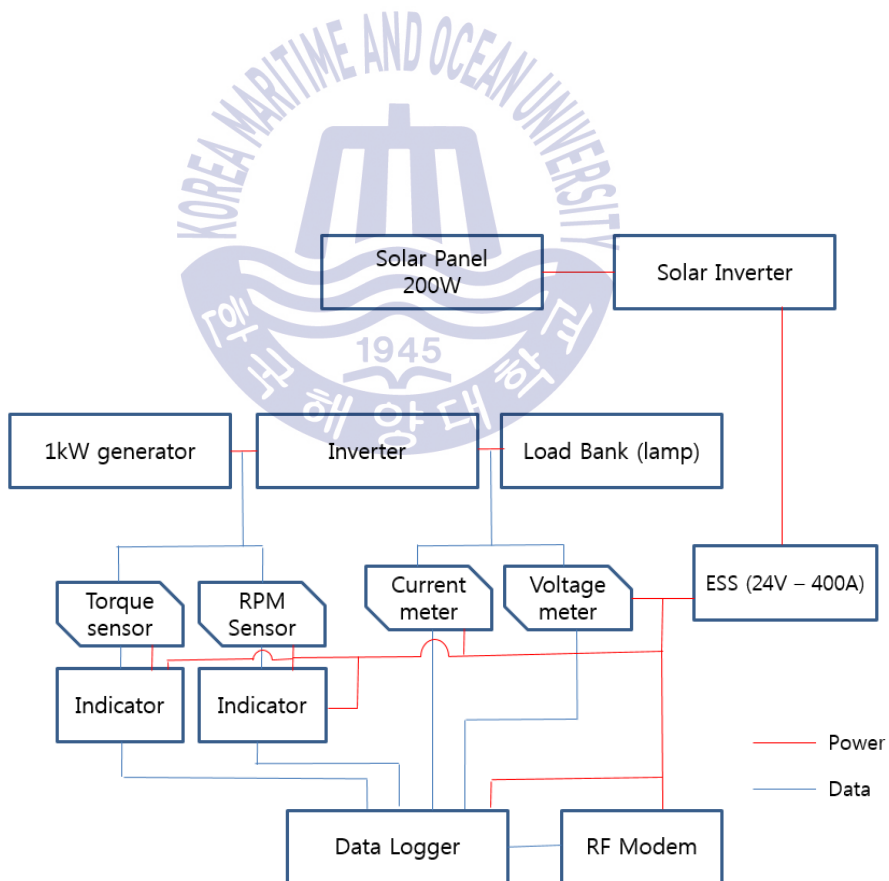


Fig. 6.25 Electric field design of real sea FWEC test facility

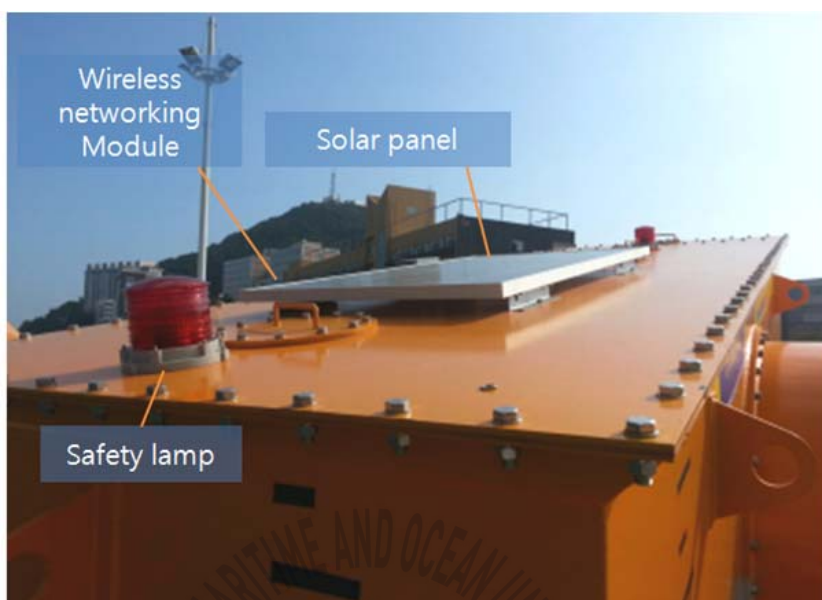


Fig. 6.26 Top side picture of FWEC test facility for real sea

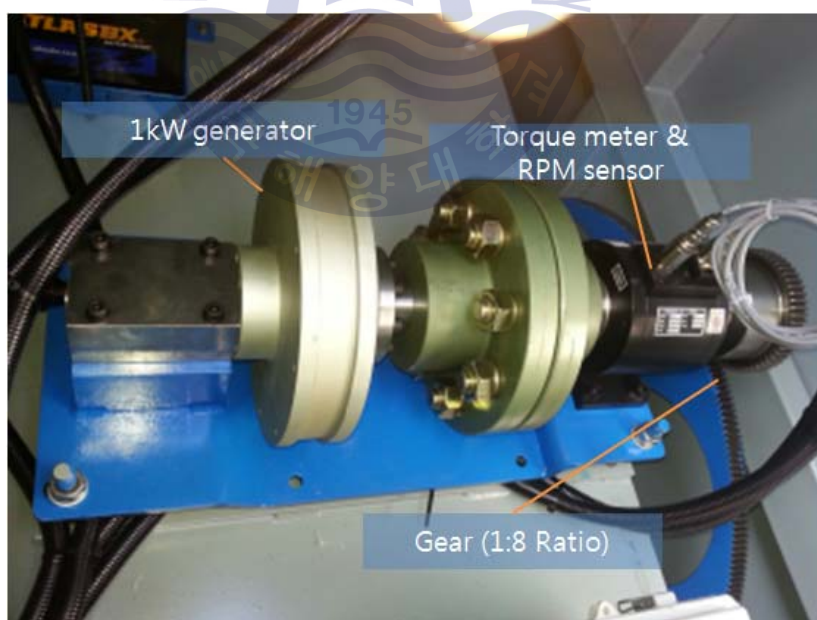


Fig. 6.27 Photo of generator and sensors

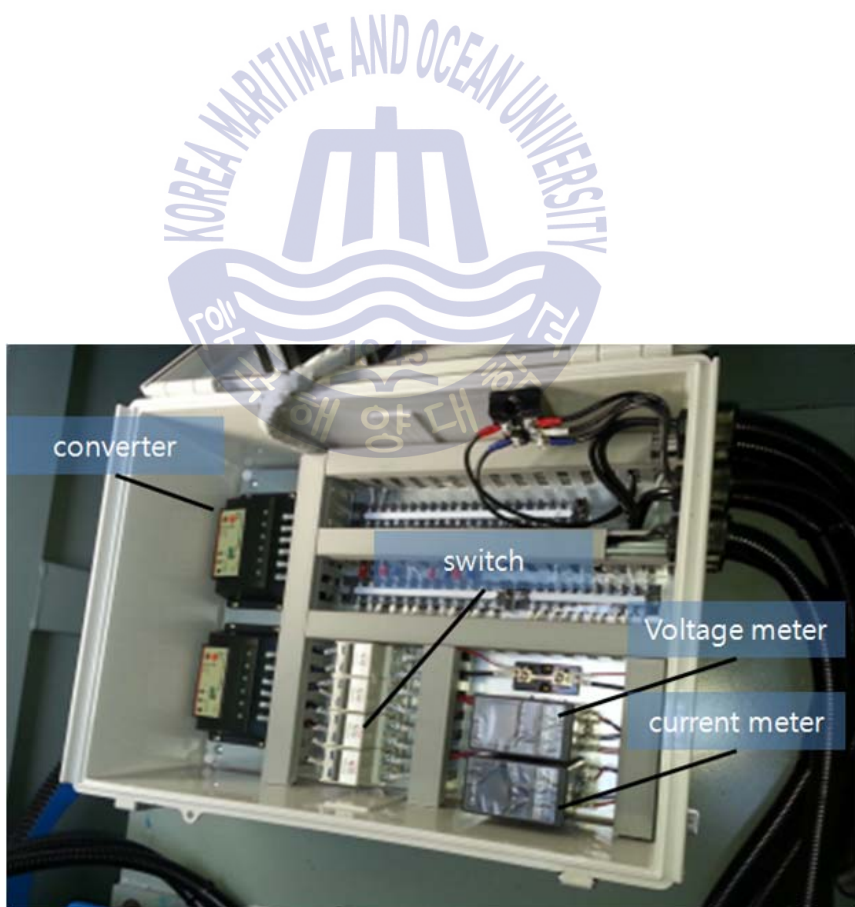


Fig. 6.28 Power measuring device and control panel

### 6.5.1 통신 모듈

본 부유식 파력발전 장치는 육상에서 300m 떨어진 한국해양대학교 인근 해상에 설치되었으며 이에 따른 무선데이터 통신은 필수적이다. 다양한 무선통신 방법들이 산재해 있는 와중에 지그-비 통신, 라디오 프리컨시 통신, 블루투스, CDMA 등 여러 가지 방법들이 활용 되었으며 아래 Fig. 6.29는 라디오 프리컨시 방식의 프로그램을 LabView를 활용하여 도식화 한 것이다.

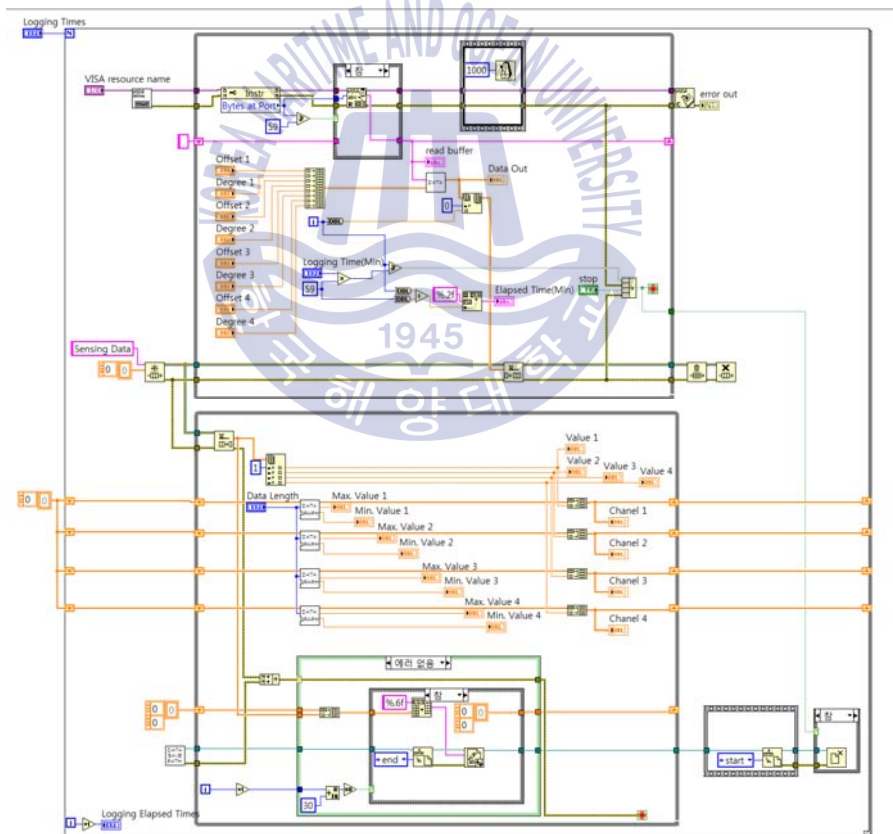


Fig. 6.29 A system algorithm for RF model

본 프로그램에서는 1초당 8ch에 대한 전압 데이터 수신을 위해 제작 되었으며 8ch에서 4ch에 대한 Monitoring과 Data 저장이 주된 목적이다. 본 파력발전 시험장치에 활용된 RF모뎀은 최대 거리 1.5km, 최대 송수신 속도 1s로서 본 파력발전 장치의 배터리로 감당할 수 있는 최선의 데이터를 받고 있으며 간략한 4ch에서 나오는 전압데이터를 amplitude 형태로 저장 후 변환하여 사용가능하다. Fig. 6.30은 그 메인 화면을 도식화 한 것이며 우측 하단의 logging time(min), logging time을 조절하여 최소 데이터 송수신 시간 및 데이터 저장 시간 등을 설정 할 수 있도록 제작 되었다.

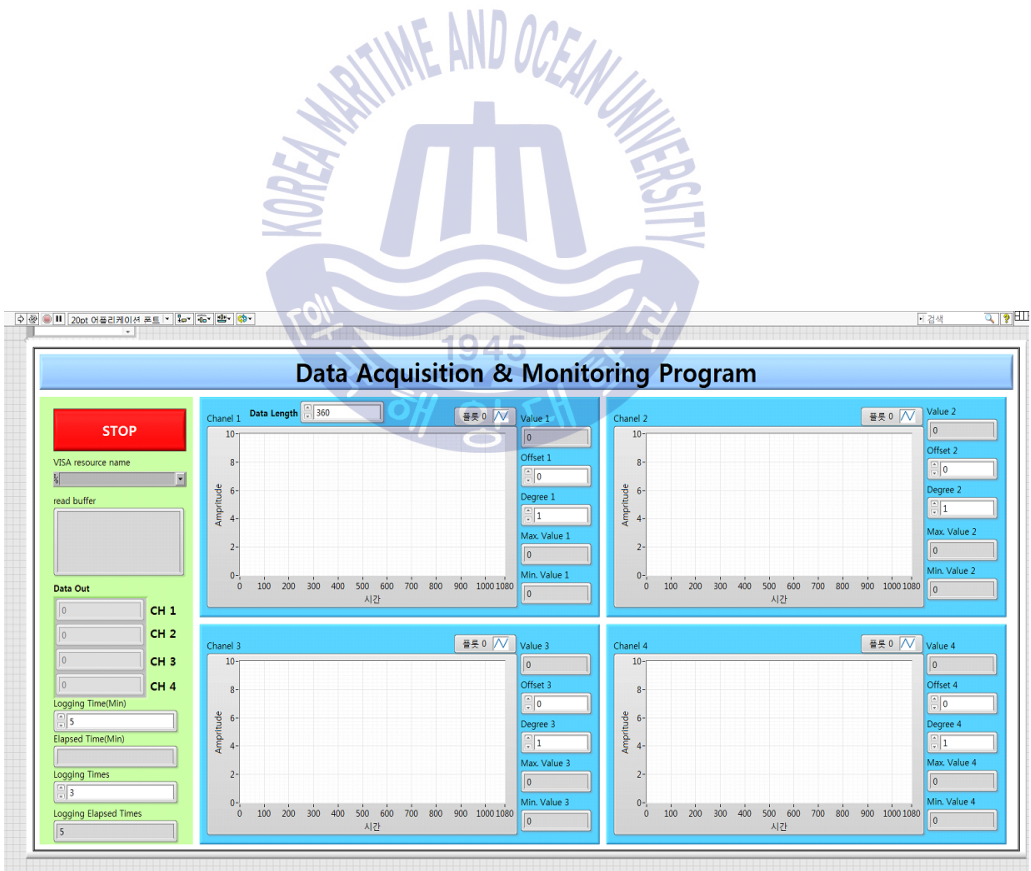


Fig. 6.30 Data acquisition and monitoring program



## 6.5.2 파랑 관측 모니터링 시스템

파랑계측은 (주)오션이엔지의 부유식 파고계측 부이(Fig. 6.31)를 설치하여 실시간으로 파랑을 계측할 수 있도록 하였다. 실시간으로 계측된 파랑데이터는 CDMA모뎀과 연동되어 1시간에 1회씩 파랑정보를 Fig. 6.32의 모니터링 프로그램으로 송신한다. 계측센서는 GPS센서, 온도센서, 파고센서가 부착되어 있으며, 기압, 수온, 유의파, 최대파, 평균파, 파주기, 위경도 정보를 포함하고 있으며 내장된 배터리는 130일간을 교체 없이 이용할 수 있으며, 실시간 전압을 송신하여 교체시기를 확인할 수 있다.



Fig. 6.31 Wave monitoring buoy (Ocean E&G co.)



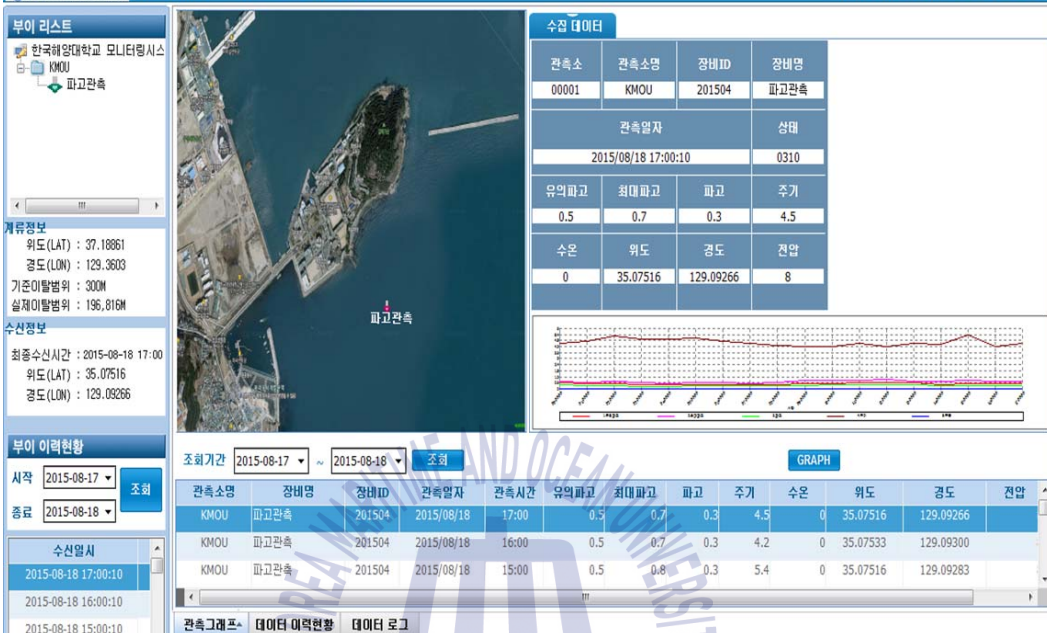


Fig. 6.32 Real time wave condition monitoring system

## 6.6 해상 설치

1차적으로 해역에 시험장치를 설치하기 위해서는 설치해역의 공유수면 점 사용 허가를 받아야 하며, 설치 장치에 대한 복원력, 안전장치, 색상 등에 대한 검토가 이루어져야 한다. Fig. 6.33은 항행안전을 위한 등부표 설치 사진을 나타내었다. 파력발전 시험장치는 야간 선박 통행의 안전에 위협을 가할 수 있기 때문에 위치정보를 송신할 수 있는 등부표를 설치하여야 한다. 이를 위하여 파력발전장치 50m 전방에 해상용 등부표를 설치하여 선박 충돌사고를 방지하였다. 실험해역 시험장치의 설치에 50Ton 크레인 바지선을 이용하여 해역에 설치하였다. 파력발전시험 장치의 실험해역 설치 과정에 대한 사진을 Fig. 6.34에 나타내었다. 1차적으로 육상에서 부두 옆 해상으로 내린 후 평형수 탱크에 펌프를 이용하여 평형수를 채워 장치의 평형을 맞춘다. 이후 바지선으로 파력발전 시험장치를 옮겨 장치-부이에 계류선을 연결한다. 바지선을 이송하여 설치해역으로 이동 후 설치하기로 예정되어 있던 위치로 이송한다. 크레인을 이용하여 해역에 파력발전장치를 투하하고 추를 이용하여 수심 및 GPS장치를 이용해 설치위치를 정밀하게 확인한 후 계류선에 연결된 침후를 설치위치에 투하한다. 최종적으로 설치된 파력발전장치를 Fig. 6.35에 나타내었으며 Fig. 6.36는 한국해양대학교에서 바라본 시험장치의 모습이다.



Fig. 6.33 Installation of safety buoy in real sea



**Shipment  
Land->Barge**



**Transport and  
Mooring connection**



**Installation position handling and anchoring**



**Fig. 6.34** Installation progress of FWEC in real sea



Fig. 6.35 Photograph of real sea area installation



Fig. 6.36 Photo of the sea area test equipment taken on the land

## 6.7 실패역 시험 결과

Fig. 6.37은 2016.1.1.~2016.1.24.기간의 실패역 시험 지역의 주기-파고 산포도이다. 1차 실패역 파랑 계측영역을 붉은 라인으로 나타내었다. 실패역 파력 발전 시험장치의 설계 포인트는 주기 5s, 파고 0.8m이상이며 계측기간이 짧았던 관계로 설계 파랑 영역의 데이터의 확보를 많이 하지 못하였다. 2차 실패역 시험을 진행한 계측기간중 약 15%구간만이 파고 1m이상을 나타내었으며 Fig. 6.38그래프는 계측기간 파고의 시계열 데이터를 나타낸 것이다. 2016.1.1.일부터 16일까지는 평균 0.3m의 유의파고를 나타내어 잔잔한 해상상황이 계속되었고 본 파력발전시험장치가 발전을 수행하지 못하였다. 본 파력발전시험장치의 설계조건에서의 파랑은 17일 13시간 가량 지속되었으며 이중 4시간 영역에서 발전을 수행할 수 있었으며 이 작동영역을 Fig. 6.37에 작동영역을 표시하였다.

본 파력발전장치의 실패역시험의 결과를 Table 6.7에 나타내었다. 작동영역은 파주기가 5s~5.5s, 유의파고는 1s~1.3s영역이다. No.1에서 유의파고가 1.3m, 파주기가 5s일 때 파랑에너지는 약 4kW이며, 파력발전시험장치의 터빈의 축동력은 154Wh로 나타났으며, 장치의 효율은 3.86%를 나타내었다. No.2에서 최대 효율을 나타내었으며 파랑에너지는 약 2.8kW, 축동력은 145W로 실패역 시험 상에서 최대효율 5%를 나타내었다. No.3에서는 파주기가 5.5s이며 유의파고는 1.2m로 파랑에너지는 3kW, 축동력은 149W로 효율은 4.8%를 나타내었으며 No.4는 파주기 5.3s, 파고 1m로 파랑에너지는 2.2kW, 축동력은 100W로 효율이 4.6%를 나타내어 총 4가지의 파랑조건상에서의 평균 효율은 약 4.6%로 나타났다.



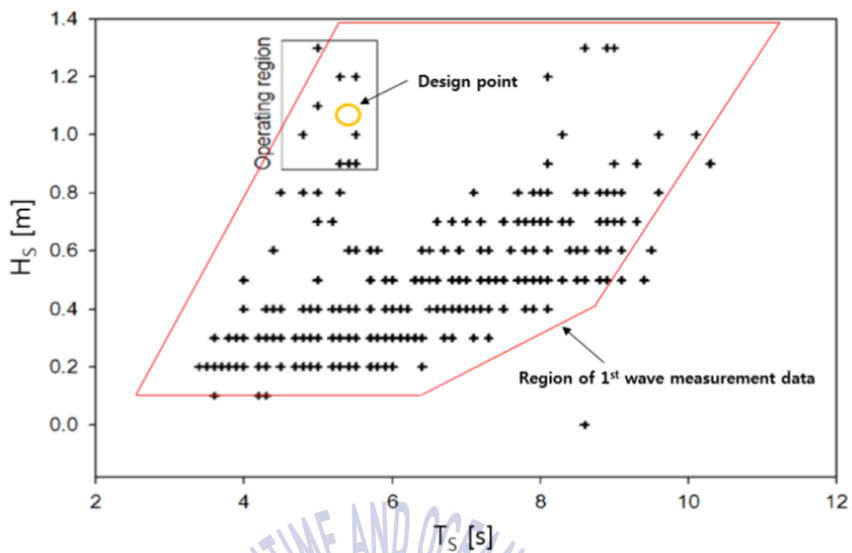


Fig. 6.37 Wave height-period Scatter Plot (2016.1.1-2016.1.24)

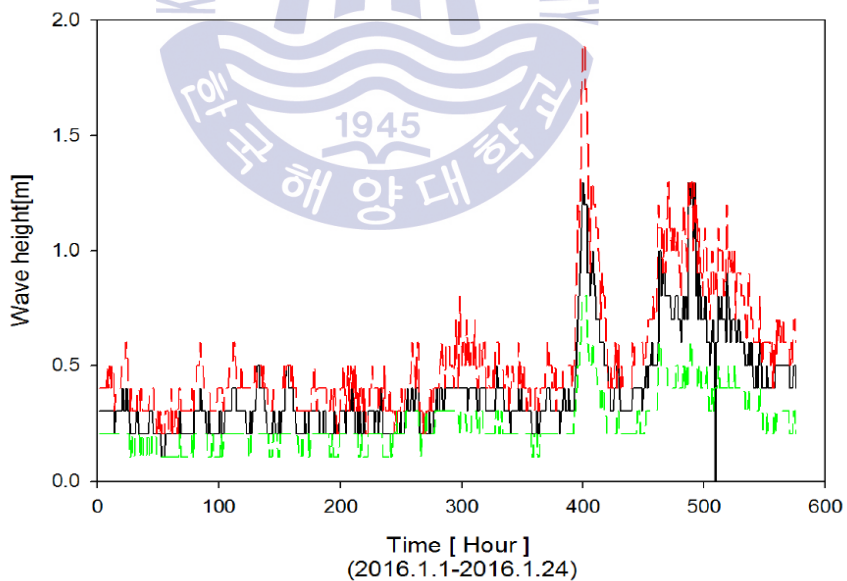


Fig. 6.38 Wave height time series data (2016.1.1.-2016.1.24.)

**Table 6.7** Real sea test results

No.	$T_p[s]$	$H_s[m]$	$P_s[w]$	$P_w[w]$	$h [m]$	$\eta_{\text{overall}} [\%]$
1	5	1.3	154	3993	7	3.86
2	5	1.1	145	2859	7	5.07
3	5.5	1.2	149	3093	7	4.82
4	5.3	1	102	2229	7	4.61



## 제 7 장 결론

국내 및 해외의 에너지 정책이 신재생에너지로 가고 있는 시점에서 신재생 에너지 발전방식 중 절대 다수를 풍력과 태양광 발전이 차지하고 있다. 하지만 국내의 환경상 국토면적이 좁고 자원량이 풍부하지 않아 육상에서의 신재생에너지는 한계에 도달할 것으로 예상된다. 국내의 이러한 환경으로 말미암아 해상풍력이나 해양에너지에 대한 관심이 높아지고 있으며, 최근에는 해양 에너지 및 파력발전에 관심을 가지는 많은 업체들이 생기고 있다. 본 연구는 부유식 파력발전장치의 컨셉모델에 대한 검증부터 다양한 시험 및 유동해석 등을 적용하여 실험역 파랑계측부터 실험역 성능평가까지의 과정을 다루었다.

아직은 여타 발전원에 비하여 연구개발 방법론, 형식, 표준화가 이루어지지 않은 관계로 새로운 파력발전장치의 연구를 수행하는 부분에 있어서 다양한 방법이 존재한다. 본 연구에서는 부유식 수류터빈을 사용하는 파력발전장치의 방법론을 제시하였고 이에 대하여 총 3파트로 나누었다.

첫째로 수류터빈을 이용한 PTO시스템에 대한 연구방법론이며 컨셉모델부터 선정된 파라미터들을 유동해석을 통하여 컨셉모델에 대한 결과를 확인하고 PTO시스템의 설계 및 시험을 통하여 도출된 결과를 시뮬레이션과 비교하여 시뮬레이션 모델에 대한 검증을 수행한다. 이렇게 검증된 시뮬레이션 모델을 이용하여 다양한 파라미터에 대한 검증, 성능예측 등을 수행하였다.

둘째로 부유체 및 계류시스템 설계에 대한 다양한 수조시험 및 시뮬레이션을 적용하여 파력발전장치의 최적응답성능을 예측하고 파장, 파고등의 다양한 파랑이 파력발전장치의 성능에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

셋째로 PTO시스템 분석과 해역에 대한 분석, 장치의 설치 수심 선정, 파랑계측 등 장치의 성능에 영향을 미칠 수 있는 인자를 찾고 이를 바탕으로 실험역 시험장치를 설계 및 실험역 시험을 수행하여 파력발전장치의 성능을 제시하였다.



본 연구를 통하여 나온 결론은 다음과 같다.

1) 파력발전장치의 설계를 위한 기초 파라미터 선정을 위하여 설치예정 해역에 파랑계측을 수행하였으며, 해역의 파랑 일몰을 분석, 제시하였다. 본 파력발전장치의 PTO시스템인 양방향 수류터빈의 시험을 통하여 관성모멘트가 터빈에 미치는 영향을 분석하였으며 양방향 수류터빈의 문제점 중에 하나인 회전수 변동에 따른 영향을 살펴보았고 이에 따라 시험모델에서  $0.053\text{kgm}^2$ 의 관성 모멘트가 적용하여 작동조건에서의 성능을 향상시켜 터빈의 최고 효율을 35%~45%에서 넓은 범위의 작동영역을 확보하였다. 또한 이러한 PTO모델의 시험을 통한 PIV계측기법을 통한 유동장 계측 및 양방향 횡류터빈의 주기 및 Pitching각에 대한 영향을 고려한 성능특성을 제시하였다, 도출된 결과를 CFD 유동해석모델과 비교하였으며 난류모델 검토, PIV유동장과의 비교, 유동해석 방법론 검증을 수행하였다. 이 결과 5%이내의 오차를 가지는 PTO 시스템 유동해석 모델을 확립하였다.

2) 부유체-PTO내부모델의 연동해석을 통하여 1kW모델의 성능 예측 및 효율을 구하였으며 1차 에너지 변환효율 34.5%, 2차 에너지 변환효율 57%을 나타내 1kW 파력발전 장치 예상효율을 19%를 도출하였으며 이에 대한 방법론을 정립하였다.

3) 20:1축소모형 부유체 응답성능시험을 통하여 파력발전장치선체가 1자유도(Pitching)운동, 2자유도(Pitching, Heaving)운동에 대하여 내부유동 흐름을 확인하였으며 Heaving운동을 구속하였을 시 작은 Pitching 각에도 내부 유동장에 흐름이 원활히 이동하는 것을 확인하였으며, 선체의 무게중심을 뒤로 이동시켜 선체가 기울어졌을 때 Heaving의 영향이 있더라도 내부유동이 원활하게 이동하여 지는 것을 확인하였다.

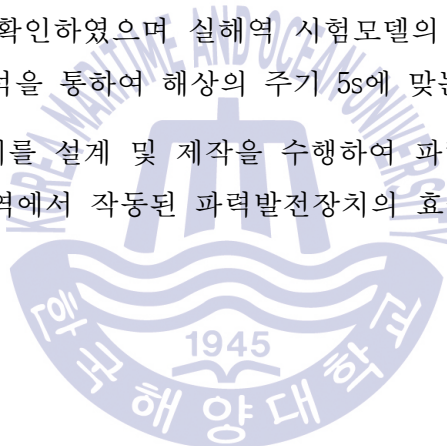
4) 대형의 조파수조에서 수행한 20W 수조 모델시험을 통하여 선체의 피칭고유진동수를 확인하였고 장치의 성능은 파랑주기에 따라 큰 영향을 받는다. 파랑주기는 수심과 함께 파장에 영향을 미치며, 파장이 모델길이의 약2배가 될 때 파력발전장치의 선체의 Pitching모션이 증가하는 것을 확인하였다. 실험

역 파고가 0.8m 이상이 되어야 10%이상의 효율을 발생하였으며 실패역 파랑 약0.5m에서는 출력이 거의 발생되지 않을 것으로 예상되었다.

5) 실패역에 설치하기 위하여 한국해양대학교 조파수조 상에서 축소모형 시험을 수행하였으며 파고와 파장을 이용하여 장치의 길이에 대한 파장의 비를 산출하였다. 이를 통하여 도출된 결과를 이용하여 최적 장치길이와 수심과의 관계를 도출하였다.

6) 실패역 시험장치를 설계하기 위하여 내부유동모델의 해석을 수행하였고, 바닥면이 10도 기울어진 모델이 터빈의 효율에 미치는 영향을 살펴보고 바닥이 기울어짐으로서 내부에 슬로싱 현상이 발생하나 효율에서는 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인하였으며 실패역 시험모델의 출력량을 예측하였고 계류시스템의 응답해석을 통하여 해상의 주기 5s에 맞는 형상을 도출하였다.

7) 실패역시험장치를 설계 및 제작을 수행하여 파랑계측과 함께 성능을 도출하였으며 설계영역에서 작동된 파력발전장치의 효율은 평균 4.8%를 나타내었다.



## 참고문헌

글로벌 재생에너지 보급 동향 및 시사점, 이영호., 2016, 에너지포커스, 13권,4호, 통권62호, pp.35-42,

정희성, 김병하, 이영호., 2017, 수치해석을 이용한 부유식 파력발전의 계류시스템 특성에 관한 연구, 한국유체기계학회 논문집, Vol.20 No.3, pp.5-10

정희성, 김병하, 이영호., 2016, CFD 코드를 통합 부류식 파력발전장치의 계류시스템에 관한 연구, 2016 한국유체기계학회 하계학술대회, pp.323

최영도, 조영진, 김유탉, 이영호., 2008, 파력발전용 횡류형 수력터빈의 성능 및 내부유동, *유체기계저널*, 제11권, 제3호, pp.22-29, 유체기계공업학회

송무석, 김도영, 김민, 홍기용, 전기천., 2004 장기 수치모사 파랑자료를 바탕으로 한 한국해역의 파랑에너지밀도 분석, *한국해양환경공학회지*, Vol. 7, No.3. pp. 152-157

Alcom, R. and O' Sullivan, D., 2012, Electrical design for ocean wave and tidal system. Ed. IET. Pg. 83-108.

Alcorn, R., Blavette, A., Healy, M., Lewis, A., 2014, EU funded CORES wave energy project: a coordinators perspective on the Galway Bay sea trials, *Underw. Technol.* 32.

Astariz, S. and Iglesias, G., 2015, The economics of wave energy: A review. *Renewable and Sustainable EnergyReviews*, 45, 397-408.

Barstow ,S., Gunnar , M., Mollison , D., Cruz , J., 2008, The wave energy resource, *Ocean wave energy*. Berlin: Springer, p. 93-132.

Bloomberg New Energy Finance (2016)

Byung-Ha Kim, Joji Wata, Mohammed Asid Zullah, M. Rafiuddin Ahmed,

Young-Ho Lee.,2014, Numerical and Experimental Studies on the PTO System of a Novel Floating Wave Energy Converter, *Renewable Energy*, pp.1-11,

Byung Ha Kim, Hui Seong Jeong, Sang Yoon Kim, Young Ho Lee., 2016, performance test of U-tube type wave energy device in real sea, *The Proceeding of 한국유체기계학회 연구개발 발표회 논문집*, 319-320

Byung Ha Kim, Hui Seong Jeong, Young Ho Lee., 2016, A methodology study of u-tube type floating wave energy converter, *The Proceeding of the 6th Asia Pacific Forum on Renewable Energy (AFORE2016)*, pp. 56

Byung Ha Kim, Hui Seong Jeong, Young Ho Lee., 2016, Hydrodynamic analysis and Ocean test of a U-tube type FWEC, *The Proceeding of The 7th International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering 2016(ISFMFE2016)*

Boccotti, P., 2007, Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening. Part I: theory, *Ocean. Eng.* 34.

Carbon Trust., 2011, Accelerating marine energy, p80

CENTER FOR OCEAN RESEARCH., 2016, The Mighty Whale, [Online] Available at : <http://www.eeng.nuim.ie/coer/doc/seminars/WEC>

%20of%20the%20Week%20%20The%20Mighty%20Whale.pdf

C G Kim, Y D Choi, Y H Lee., 2012, A study on the flow characteristics of a direct drive turbine for energy conversion generation by experiment and CFD, *2012 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 15 072004 doi:10.1088/1755-1315/15/7/072004

Dalton, J., 2015, Economic and socio-economic assessment methods for ocean renewable energy: Public and private perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Deepak Prasad, Young-Ho Lee., 2012, Maximizing Primary Energy Conversion in a Direct Drive Turbine for Wave Power Extraction, *International Journal of Mechanic Systems Engineering (IJMSE)* Volume 2, Issue 4 November 2012 PP. 132-140

Deepak Divashkar Prasad, M. Rafiuddin Ahmed, Young-Ho Lee., 2014, Flow and Performance Characteristics of a Direct Drive Turbine for Wave Power Generation. *Ocean Engineering*, Vol. 81 pp. 39-49

Dixon, S.L. and Hall, C.A., 2014, Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, *seventh ed.*, Elsevier, Amsterdam.

European wave energy pilot plant on the island of Pico., 2016, Azores, Portugal. phase two: equipment, [Online] Available at : [http://cordis.europa.eu/docs/publications/4769/47698021-6\\_en.pdf](http://cordis.europa.eu/docs/publications/4769/47698021-6_en.pdf)

Equimar Project., 2010, Procedures for Estimating Site Accessibility and Appraisal of Implications of Site Accessibility.

Evans, D.V., 2014, A submerged cylinder wave energy converter with internal sloshing power take off” , Eur. J. Mech. B-Fluids 47.

Fonseca, N., Ribeiro e Silva, S. and Pessoa, J., (2012): “The royal institution of naval architects numerical modelling and assessment of the ugen floating wave energy converter” , *Advances in Centre for Marine Technology and Engineering*, Portugal pp. 1-10. 79

Fonseca, N., Pessoa, J., Ribeiro e Silva, S., Le Boulluec, M., Ohana, J. , 2012, Model tests of a wave energy converter based on a water oscillating in a U tank, *Advances in 12èmes Journées de l'hydrodynamique*.

Fonseca, N. and Pessoa, J., 2013, Numerical modeling of a wave energy converter based on U-shaped interior oscillating water column, *Appl.*

*Ocean. Res.* 40.

Frederik, K. and Hansen, S., Analysis of estimations, quotations and actual costs related to dry-docking.

Falcão, A.F.O. and Gato, L.M.C., 2012, Comprehensive Renewable Energy vol. 8, Ocean Energy, Elsevier, Oxford

Falcao, F.D.O., 2004, Stochastic modelling in wave power-equipment optimization : maximum energy production versus maximum profit.

Falcão, A.F.O., Gato, L.M.C. and Nunes, E.P.A.S., 2013, A novel radial self-rectifying air turbine for use in wave energy converters, *Renew Energy*, vol. 50, pp. 249-252.

Falcão, A.F.O., Gato, L.M.C. and Nunes, E.P.A.S., 2013, A novel radial self-rectifying air turbine for use in wave energy converters. Part 2. Results from model testing, *Renew. Energy*, vol. 53, pp. 159-164.

Falcão. F., 2010, Wave energy utilization: A review of the technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 3, pp. 899-918.

Falcão, A.F.O. and Rodrigues, R. J. A., 2002, Stochastic modelling of OWC wave power plant performance, *Applied Ocean Research*, vol. 24, no. 2, pp. 59-71.

Falcao, A.F.O., 2000, The shoreline OWC wave power plant at the Azores, *Proceedings of 4th European Wave Energy Conf*, Aalborg, Denmark, pp. 42e47.

Goda, Y., 2000, Random Seas and Design of Maritime Structures. *World Scientific Publishing*, Singapore.

Gunnar Mørk, Stephen Barstow, Alina Kabuth and M. Teresa Pontes., 2010, Assessing the Global Wave Energy Potential, Paper no. OMAE2010-20473, *The Proceeding of ASME 2010 29th International*

*Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2010)*, vol.3, pp. 447-454.

Hotta, H., Miyazaki, T., Ishii, S.I., 1988, On the performance of the wave power device Kaimei, *Proceedings of 7th Int Conf Offshore Mech Arct Eng*, New York.

Heath, T., Whittaker, T.J.T., Boake, C.B., 2000, The design, construction and operation of the LIMPET wave energy converter (Islay, Scotland), *Proceedings of 4th European Wave Energy Conf*, Aalborg, Denmark, pp. 49e55.

IEA/OECD, 1989, Projected costs of generating electricity from power stations for commissioning in the period 1995-2000 .Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development: Nuclear Energy Agency.

International Energy Agency., 2010, Projected Costs of Generating Electricity.

International Energy Agency., 2010, Annex II Extension Development of Recommended Practices for Testing and Evaluating.

Longuet-Higgins, M. S., 1952, On the statistical distribution of the heights of sea waves, *Journal of Marine Research*, vol. 11, pp. 245-266.

Mohammed Asid Zullah, Young-Ho Lee., 2013, Performance evaluation of a direct drive wave energy converter using CFD, *Renewable Energy*, Volume 49, January 2013, Pages 237-241

McCormick, M.E., 1974, Analysis of a wave energy conversion buoy.

McCormick, M.E., 1974, A modified linear analysis of a wave-energy conversion buoy, *Ocean. Eng.* 3.

Mohammed Asid Zullah, Young-Ho Lee., 2016, Fluid-structure interaction simulation of a floating wave energy convertor with water-turbine driven



power generation, *한국마린엔지니어링학회지*, Vol. 40, No. 8, pp.710-720

Mohammed Faizal, M. Rafiuddin Ahmed, Young-Ho Lee., 2014, A Design Outline for Floating Point Absorber Wave Energy Converters, *Advances in Mechanical Engineering*, pp.1-18

Greenhow, M. J. L., 1981, Technical note, vol. 3, no. 3, pp. 145-147.

Masuda, Y. and McCormick, M.E., 1986, Experiences in pneumatic wave energy conversion in Japan. Utilization of Ocean Waves e Wave to Energy Conversion, *Amer Soc Civil Eng*, New York, pp. 133.

Ohneda, H., Igarashi, S., Shinbo, O., Sekihara, S., Suzuki, K., Kubota, H., 1991, Construction procedure of a wave power extracting caisson breakwater, *Proceedings of 3rd Symp Ocean Energy Utilization*, Tokyo, pp. 171e179.

Ogata, T., Washio, Y., Osawa, H., Tsuritani, Y., Yamashita, S., Nagata, Y. , 2002, The open sea tests on the offshore floating type wave power device Mighty Whale: performance of the prototype, *Proceedings of 21st Int Conf Offshore Mech Arct Eng*, Oslo, Norway, Paper No OMAE2002e28335.

Pizer, D., 1993, The numerical prediction of the performance of a solo duck, pp. 129--137. *Eur. Wave Energy Symp.*, Edinburgh

Raghunathan, S., 1995, The wells air turbine for wave energiy conversion, vol. 31, no.95, pp. 335-386.

Raghunathan, S.,1995, The wells air turbine for wave energiy conversion, vol. 31, no.95, pp. 335-386.

Rea, J., Kelly, J., Alcorn, R., O'Sullivan, D., 2011, Development and operation of a power take-off rig for ocean energy research and testing, *Proceedings of 9th European Wave Tidal Energy Conf*, uthampton.

Ribeiro e Silva, S., Fonseca, N. and Pessoa, J., 2010, Tanque flutuante assimétrico conversor de energia das ondas - Asymmetric floating tank for wave energy conversion” National Patent Registry Nr. 105368 [Online] Available online at: [http://www.mar.ist.utl.pt/centec/public/FCT/UGEN Patente.pdf](http://www.mar.ist.utl.pt/centec/public/FCT/UGEN%20Patente.pdf) ), Lisboa, Portugal.

Ribeiro e Silva, S., Gomes, R.P.F., Falcão, A.F.O., 2016, Hydrodynamic Optimization of the UGEN : Wave Energy Converter with U-shaped Interior Oscillating Water Column, *International Journal of Maritime Energy*.

RPS Consulting Engineers., 2010, Samcheok Wave Resource Study.

Roman, L., 2012, Wave hub.

Sangyoon Kim, Byungha Kim, Joji Wata, Young-Ho LEE., 2016, Hydraulic Model Test of a Floating Wave Energy Converter with a Cross-flow Turbine, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol.9, No3, pp.222-228, July

Teillant, B., 2016, Cost of electricity – key concepts and definitions, in OceanNET short course No. 8 – Offshore renewable farms – Penryn, UK.

Thorpe, T .W., 1999, A brief review of wave energy, A report produced for The UK Department of Trade and Industry,

Thesis, D. and Quante, P., 2012, Maritime Infrastructure and Operator Selection Tool for Offshore Wind Installations.

Trading economics., 2016, [Online] Available at : <http://www.tradingeconomics.com/commodity/steel>

Inflation EU., 2016, [Online] Available at :<http://www.inflation.eu/inflation-rates/portugal/historic-inflation/cpi-inflation-portugal-2003.aspx>

Washio, Y., Osawa, H., Nagata, Y., Fujii, F., Furuyama, F., Fujita, T., 2000, The offshore floating type wave power device Mighty Whale: open sea tests, *Proceedings of 10th Int Offshore Polar Eng Conf*, Seattle.

Wilde, J., 2003, Economies of scale , engineering resource and Industry. Carbon Trust.

World Energy Council., 2013, World Energy Perspective, Cost of Energy Technologies.

Y.D. Choi, J.I Lim, Y.T. Kim, Y.H. Lee., 2008, Performance and internal flow characteristics of a Cross-flow hydro turbine by the shapes of nozzle and runner blade, *Journal of Fluid Science and Technology*, vol. 3, pp.398-409

Y. Washio, H. Osawa, Y. Nagata, F. Fujii, H. Furuyama and T. Fujita .,2000, The Offshore Floating Type Wave Power Device “Mighty Whale”: Open Sea Tests, *The Proceeding of International Offshore and Polar Engineering Conference*